# 超硬合金の加工のおける印加電圧の
# 加工特性に及ぼす影響

特殊加工研究室

指導教員　小林 和彦

知能機械システム工学科

1060131

小松 富士生

目次

第１章 .緒言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
　　放電加工の原理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3
第２章　印加電圧が超硬合金加工特性に及ぼす影響について
　1.研究目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・4
　2.実験装置及び測定方法
　　2－1.実験装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
　　2－2.実験装置接続図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
　3.放電加工機電源回路
　　3－1.放電加工機電源回路について・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13
　　3－2.電源回路の改造・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 14
　4.加工方法及び加工条件
　　4－1.加工条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
　　4－2.加工方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24
　5.測定方法及び測定結果
　　5－1.電極の測定方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
　　5－2.測定結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27
第３章　放電加工機の電源回路解析
　1.形彫放電加工機の電源回路について・・・・・・・・・・・・・・・・ 59
　2.リアクトル電流が流れる回路について・・・・・・・・・・・・・・・ 66
第４章　電極に歯車を用いたサンプル加工
　1.加工方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 95
　2.サンプル加工後・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 96
第５章　結言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 98
　　謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・99
　　参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・99

# 第１章　緒言

近年金型製品は小さく複雑になってきており、金型に求められる加工精度も高く要求される時代に突入してきた。しかし現在の金型の多くに使用されている工具鋼やダイス鋼の金型は、磨耗が激しく金型寿命が短いという問題を抱えている。そのため短期間にいくつもの新しい金型を製作する事が必要となるためコストが高くなってしまう。また時代の流れから多品種少量化や短期納入が要求される様になり、製品の納期が非常に厳しくなってきている。そのような時代の中、短期間にいくつもの金型を製作することは、多くの時間とコストがかかるため非常に効率が悪いと考えられる。そこで今まで金型の多くに使われてきた工具鋼やダイス鋼に比べ、高硬度で弾性率が大きく熱膨張による寸法変化が小さい超硬合金が、今後の金型産業の主流になってくると考えられる。

しかし超硬合金はダイヤモンドの次に硬いといわれる材料で、工具を使用する切削加工などでは、工具磨耗が激しく加工出来ないということが最大の課題とされている。そこで唯一加工できる加工方法として放電加工が上げられる。放電加工は文字通り、放電を利用し金属材質を加工するという特徴を持っている。型彫放電加工では、電極に銅やグラファイトという柔らかな導電性の材料を使用し、工作物の硬さに関係なく導体であればどのような材料でも数マイクロ単位の誤差内に収まる高精度な金型製作加工が可能である。

型彫放電加工機で超硬合金を加工する場合、電極に銅タングステンを使用する場合が多く、電極の消耗が非常に激しいという問題があげられる。このように電極消耗が激しいため、一つの金型を製作する場合、荒加工(20～30μm)から仕上げ加工(1～2μm)の表面粗さまで加工するまでに数本の電極を使用しながら規定の金型寸法に仕上げるようになってくる。電極を制作するには同じように切削加工しても、工具の磨耗やその他の要因が影響し数マイクロ単位で寸法誤差が発生する。このように電極を精度良く同一形状に製作するのは不可能に近い。またコストや時間がかかってしまうため、多品種少量や短期納入が要求される現在の時代に対応できなくなってしまう。銅タングステンは普通の銅電極の数十倍のコストがかかるため、荒加工から仕上げ加工までの電極本数が多くなればなるほど製品のコストが高くなってしまう。そこで荒加工から仕上げ加工までを放電加工で行う場合、電極本数を少しでも減らすことは製品のコストダウンにつながると考えられる。

・放電加工の原理

放電加工の加工原理を下図とともに説明する。

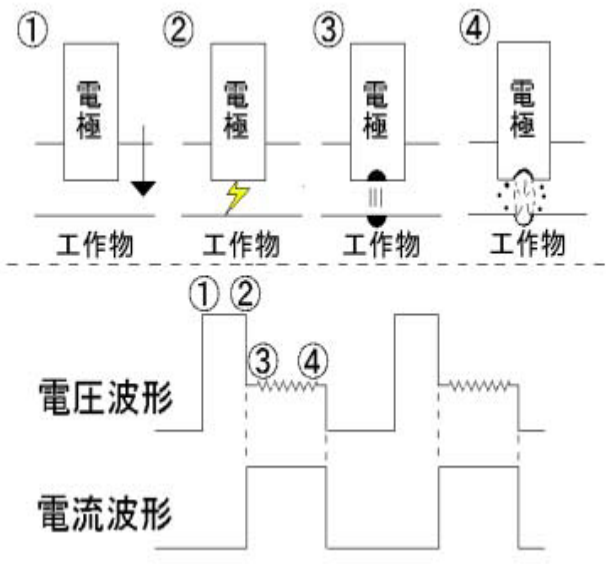


図 1-1.放電加工の原理図

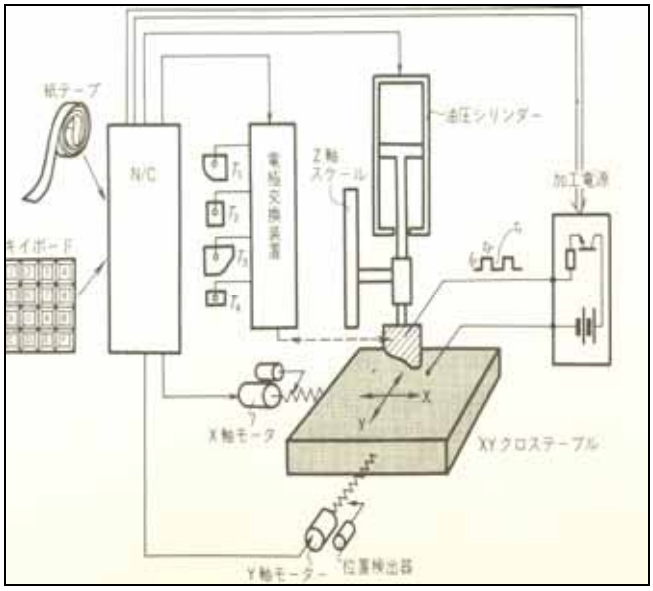


図 1-2　形彫放電加工機原理図

① 電極と工作物の間に電源から電圧が加えられ電極が降下してくる。このとき、電極と工作物との距離は数μm まで接近する。この段階ではまだ電極と工作物の間に流れている加工液が絶縁体の役割を果たしているため、電圧は加わっているが電流は流れない。

② 電極と工作物の距離が最も狭い一点で、電圧によって絶縁破壊が起き火花放電が発生する。

③ 火花放電が発生した場所を中心に電流が流れ込み、火花はさらにエネルギーの高い「アーク柱」になる。このアーク柱の温度が数千度にもなり、この熱によって工作物を融解状態にさせる。

④ 発生したアーク柱の周りにある油が気化され、液体から気体になって膨張し局部的な爆発現象を起こす。この勢いで融解した金属が飛散する。

⑤ 電源のトランジスタがOFF になって、電源のパルス電圧の供給を止めることで、アーク柱が消滅して、飛び散った融解金属は、冷却されて加工屑になる。

# 第 2 章　印加電圧が超硬合金の加工特性に及ぼす影響について

## 1.研究目的

形彫放電加工は特定の電極形状を用いることで、工作物に反対形状を投射加工する加工をおこなう。そこで加工された形状は、電極と工作物間で数μm から数十μm の誤差内と精度良く仕上げることができるため電極形状が複雑でも加工可能である。電極に銅、工作物に鋼の場合、電極消耗率が１%以下という低消耗加工が可能であるが、電極に銅タングステン、工作物に超硬合金の場合、電極消耗率は 18～27%と低消耗領域は存在しないことから、超硬合金加工における電極消耗は避けられないと言われている。そのため電極を工作物に投射加工する形彫放電加工では、電極の消耗形状が工作物に与える影響は非常に大きく、電極消耗が大きければ電極コーナーR (図.2-1 の囲んだ部分)が大きくなるため加工後の工作物のコーナーR(図.2-2 の囲んだ部分)に影響する重要なファクターとなってくる。今までにパルス幅や電流ピーク値に対する電極消耗形状についての研究は多く行われてきたが、極間電圧(以後、印加電圧)についての研究はほとんどされていない。そこで本研究では、印加電圧を 80V～50V まで変化させることにより電極消耗形状がどのように変化するかについての研究を行った。

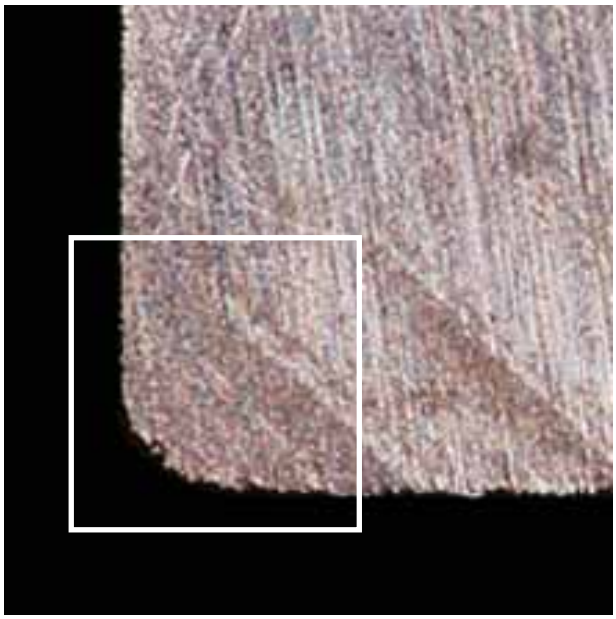

図.2-1 加工後の電極

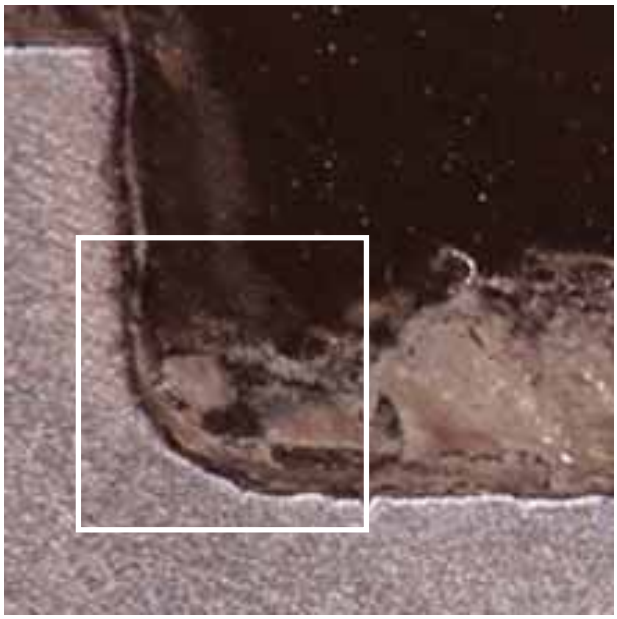

図.2-2 加工後のワーク

## 2.実験装置及び測定方法

### 2－1.実験装置

(1)形彫放電加工機　三菱電機社製 VX10

本研究は、図.2-3 に示す三菱電機製形彫放電加工機 VX10 を用いて行った。また、同機の主な仕様を表 2-1 に示している。

図.2-3 形彫放電加工機の外観写真

表 2-1　型彫放電加工機　VX-10 の主な仕様

| | |
|---|---|
| 最小指令単位 | 0.1μm |
| 最小駆動単位 | 0.1μm |
| 駆動方式 | AC サーボモーター |
| 位置検出方式 | ロータリーエンコーダー |

表 2-2　加工に使用した材料

| | 材質名 | 型式名 | 製造元 |
|---|---|---|---|
| 電極 | 銅タングステン | NEL－150 | アライドマテリアル |
| ワーク | 超硬合金 | G5 | 住友金属工業 |

加工に使用した材料としてワークは超硬合金 G5 を使用し電極に銅タングステン電極により加工を行った。

(2)ソニー製　テクトロニクス　デジタルオシロスコープ TDS540B

デジタルオシロスコープは図.2-4 に示したソニー製テクトロニクス、デジタルオシロスコープ TDS540B を使用し、その仕様として表 2-3 に示す。

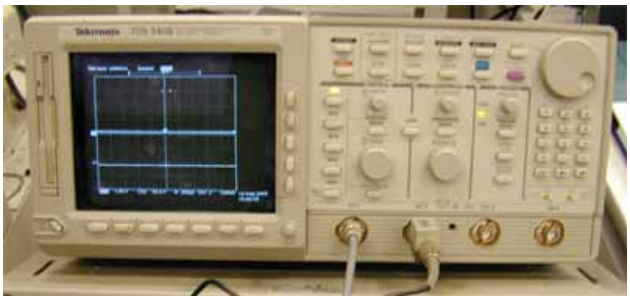

図.2-4 デジタルオシロスコープ

表 2-3　デジタルオシロスコープ　測定レンジ

| | |
|---|---|
| 1ch | 1V |
| 2ch | 50V |
| M | 200、500μm |

(3)横河電機製　携帯用電流計　型式　2011 33

電流計は図.2-5 に示した横河電機製　携帯用電流計　2011 33 を使用し、その仕様は表 2-4 に示す。

図.2-5 携帯用電流計

表 2-4　携帯用電流計　測定レンジ

| | |
|---|---|
| 測定レンジ | 0～30(A) |

（4）山菱電機製　電圧調整機 S3P-240-30

電圧調整期は図.2-6 で示した山菱電機製、電圧調整機を使用し、その仕様を表 2-5 に示す。

図.2-6 山菱電機　電圧調整機

表 2-5 電圧調整機　電圧調整範囲

| | |
|---|---|
| 電圧調整範囲 | 0～90V |

(5) ワイヤ放電加工機　三菱電機社製 SX10

本研究で、電極及びワークの切断に使用した加工機は図.2-7 に示す三菱電機社製 SX10 を使用し、その仕様を表 2-6 に示す。

図.2-7　ワイヤ放電加工機

表 2-6 ワイヤ放電加工機に使用したワイヤ

| | 材質名 | 製造元 |
|---|---|---|
| ワイヤ | OB－20P 直径 02mm 黄銅ワイヤ | 沖電線 |

(6) オムロン製　3D デジタルファインスコープ　VC3000

測定顕微鏡は図.2-8 示すオムロン製の 3D デジタルファインスコープを使用し、その仕様を表 2-7 に示す。

図.2-8 測定顕微鏡

表 2-7　3D デジタルファインスコープに使用したレンズ

| | |
|---|---|
| 対物レンズ倍率 | 20～160 倍 |
| | 100～600 倍 |

(7)メトラー・トレド製　AG204 天秤

今回使用した、天秤を図.2-9 に示す。

図.2-9　測定に使用した天秤

## (8)株式会社マルトー　ドクターラップ　ML-180

図 2-10 は今回使用した研磨機で、表 2-8 はその主な仕様である。

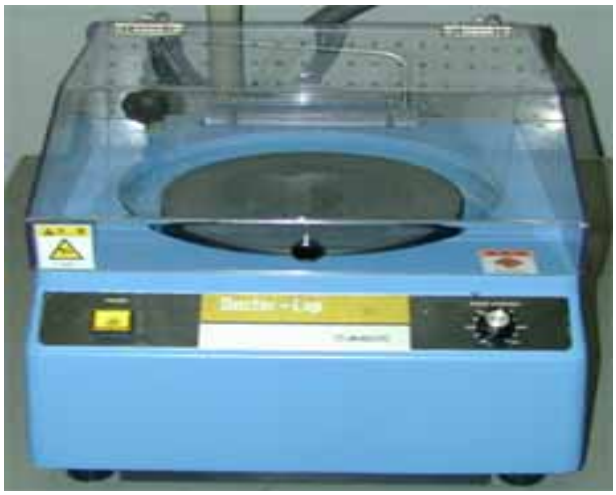

図.2-10　研磨及びバフ研磨機

表 2-8　研磨機の主な仕様

| | |
|---|---|
| 電動機 | 単相　100V　75W |
| ラップ回転数 | 50～500r/min （50Hz）　無段変速 |
| ラップ定盤 | φ200㎜（φ204㎜） |
| 本体の大きさ | W320×L380×H175㎜（ノズル高さ含まず） |
| 本体質量 | 約 25kg |

## (9)株式会社東京精密製　表面粗さ測定機　サーフコム 480A

表面粗さ形状測定機は図 2-11 に示した株式会社東京精密製表面粗さ測定機を使用し、その主な仕様を表 2-9 に示す。

図.2-11　表面粗さ形状測定機

表 2-9　表面粗さ形状測定機の主な仕様

| | |
|---|---|
| 測定レンジ | 800、80、8μm |
| 変換器 | 差動変圧器 |
| 触針先端の材質 / 形状 | ダイヤモンド / 2μmR60°円錐 |
| 測定力 | 0.7mN(0.07gf) |
| パラメータ（JIS） | Ra、Rmax、Ry、Rz |

表面粗さ測定機は、形彫放電加工後の加工表面に用い、本章の研究においては Ｒｙを使用した。測定方法は、加工表面の上部、中部、下部と 3 箇所の平均値を取る方法を用いた。測定において、カットオフ値は 0.8mm を用い、評価長さは 4mm で行った。

## 2－2.実験装置接続図

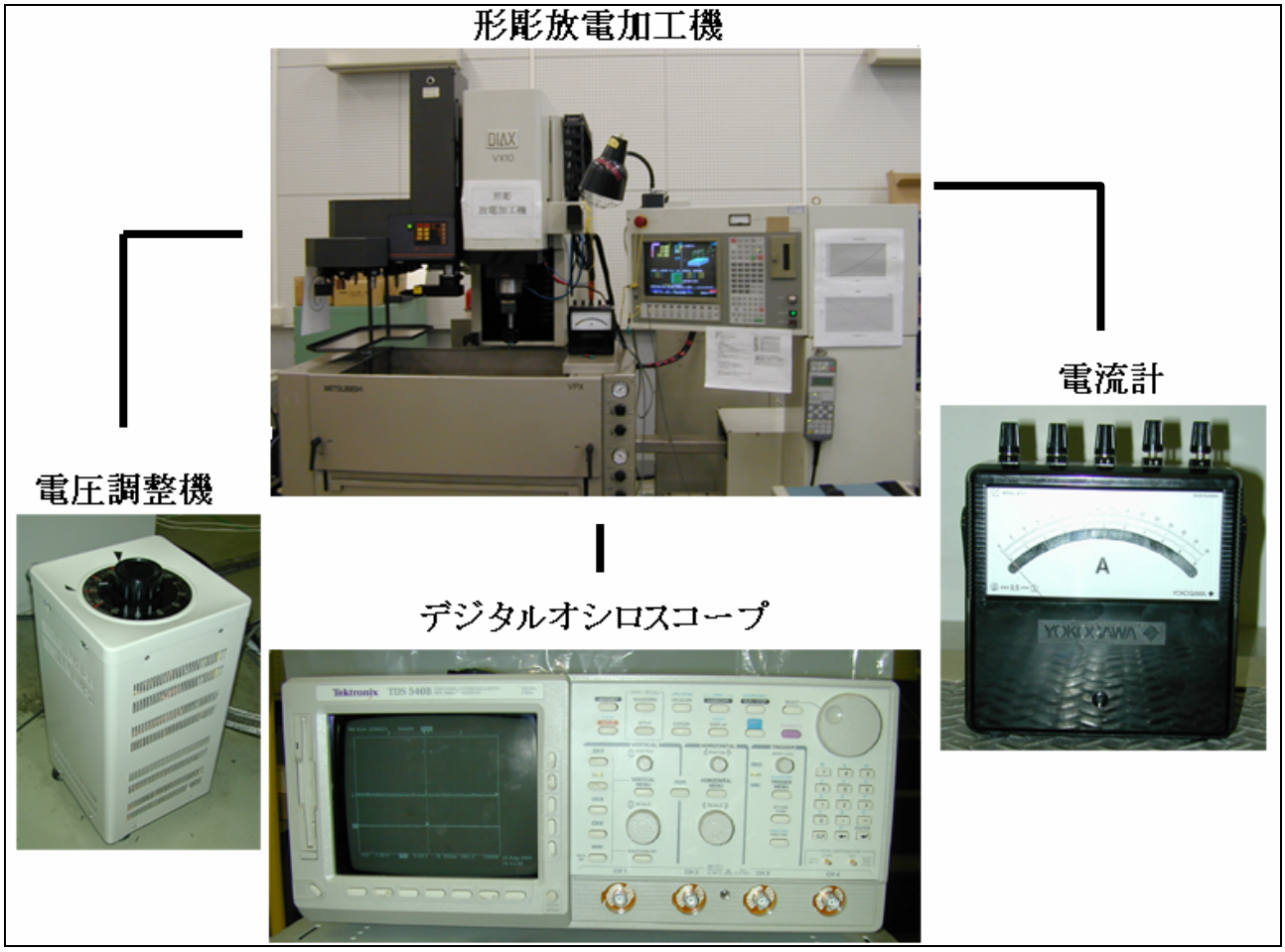


図.2-12　全体の装置接続図

図.2-12 は今回使用した実験装置の接続図を示したものである。電圧調整機は放電加工機の一次側の交流部分に接続されており電圧を 80V から 50V まで調節できるようにした。デジタルオシロスコープは加工中の電圧波形と電流波形を測定するため、また加工が安定しているか不安定になっているか見るために接続し、電流計は加工中の平均電流を測定するために接続した。

# 3.放電加工機電源回路

## 3－1.放電加工機電源回路について

一般の放電加工機は印加電圧を 80V の条件に設定されており、表 2-9 のように印加電圧を 80V から 320V まで GAP 設定することにより極間電圧を簡単に調節することが可能である。このように印加電圧を 80V から 320V まで高くすると、極間に重畳する電圧も高くなるため放電間隙が広くなり加工屑(以後、スラッジ)の排出が良くなり短絡現象が少なく加工が安定する。しかし印加電圧を 80V から 320V まで電圧を高くすると、加工速度が速く加工は安定するが放電ギャップが大きくなってしまう。

そこで印加電圧を 80V から低くすると放電ギャップが狭くなり、加工中の放電エネルギーが減少するため電極消耗形状を少なくできるのではないかと考えられる。このように印加電圧を下げると放電ギャップが狭くなるため、電圧が高い条件に比べ電極コーナーR 形状が小さく加工物のコーナー形状もシャープエッジに近く精度良く加工できると考えられる。しかし一般の放電加工機は上で説明したように、印加電圧を高くするには GAP 設定で簡単に条件を変化できるが、印加電圧を 50V まで下げるには電源回路を改造しないといけない。そこで今回電源回路計算を行い、目標の印加電圧に下がるように放電加工機裏の電源回路を変更したいと考えた。そこで以下に、従来の電源回路と改造後の電源回路計算を行った計算について説明する。

表 2-9 GAP 設定

| GAP | 印加電圧 |
|---|---|
| MV | V |
| 10 | 80 |
| 11 | 110 |
| 12 | 150 |
| 13 | 220 |
| 14 | 280 |
| 15 | 320 |

## 3－2.電源回路の改造

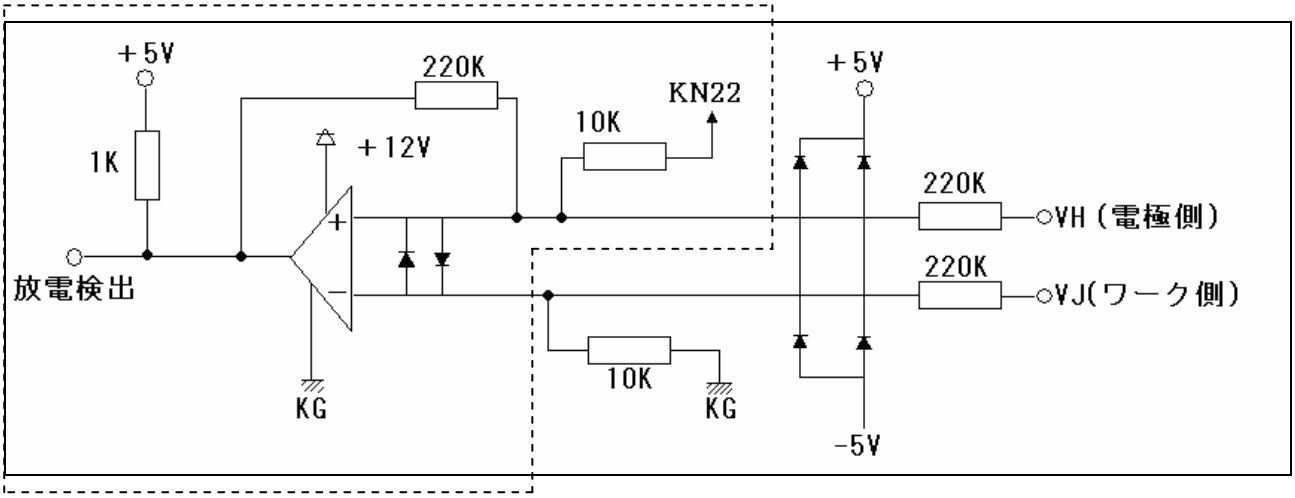


図.2-13　放電検出回路

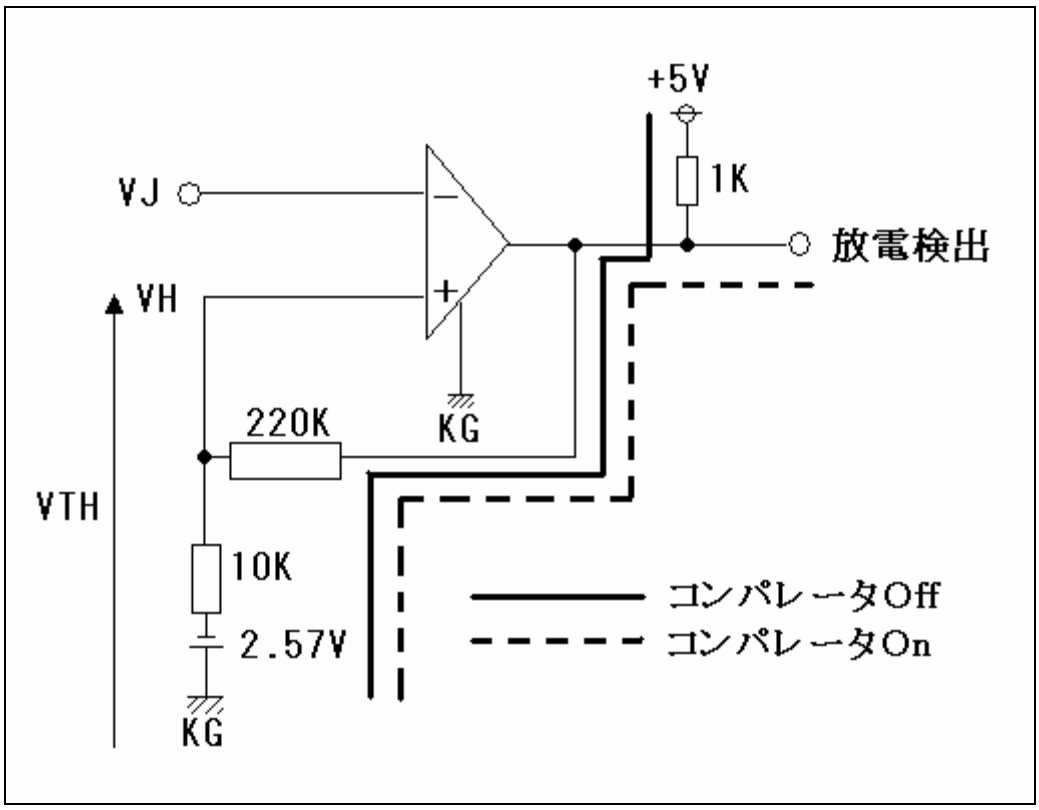


図.2-14　上の点線で囲んだ部分を拡大した回路

図.2-13 は、放電加工機の放電検出部分の電源回路を示した図である。図.の点線で囲んだ部分を抜き取り、拡大した回路図を下の図.2-14 に示す。この図.2-14 の回路に示してある KG 部分から電流が流れて電圧 2.57V を通り、10K と 220KΩの抵抗を通過し、放電検出に流れる回路をコンパレータ On と仮定し、KG から電圧 2.57V を通り、10K、220K、1KΩを通過し 5V の電圧方向に流れる回路をコンパレータ Off とおき計算を行っていく。

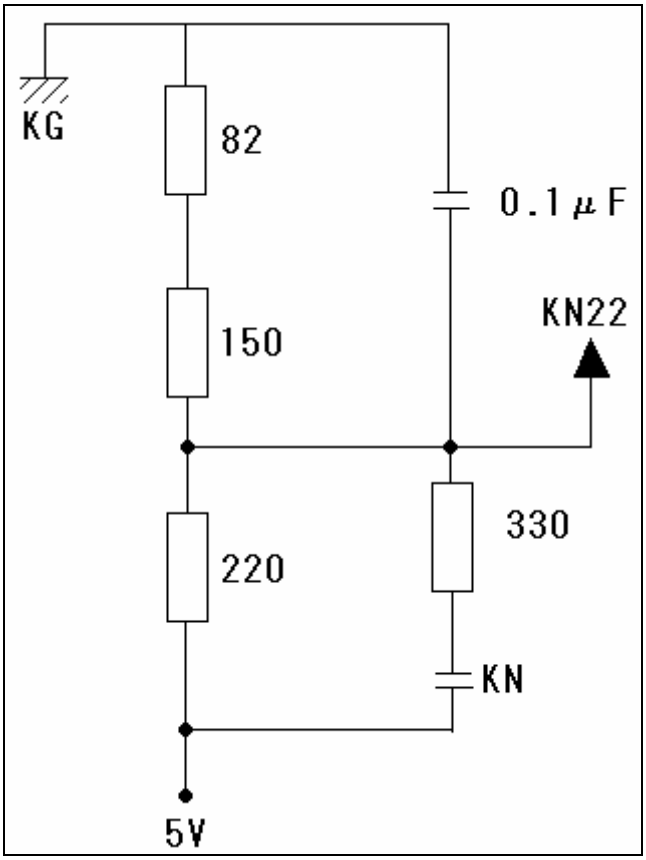


図.2-15　KN22 電源回路

図.2-15 は KN22 電源回路を示した図である。図.2-15 の KN22 は図.2-13 の KN22 につながっており、この回路内の抵抗を変化させることで加工中の印加電圧を設定することができると考えられる。そこで図.2-15 の電源回路に示している左半分の抵抗、82Ω+150Ω+220Ω と RN のコンデンサが入らない状態で加工する場合は放電検出 52V になり、主に電極に銅を使用する加工の際にこの回路が作動する。また RN のコンデンサが On になる場合は全体の回路が On になるため、82Ω+150Ω+220Ω+330Ω とすべての抵抗が作動する状態で加工すると放電検出は 65V になる。このように RN のコンデンサが On になる状態では、電極にグラファイト電極を使用する時にこの回路を使用する。今回の研究では電極に銅タングステン、ワークに超硬合金を用いて加工を行うので RN が On にならない 82Ω+150Ω+220Ω の電源回路を使用する。

## *KN*22電源

$$KN22 = \frac{82+150}{82+150+220} \times -5 \quad \cdots\cdots (1)$$

$$= -2.56V$$

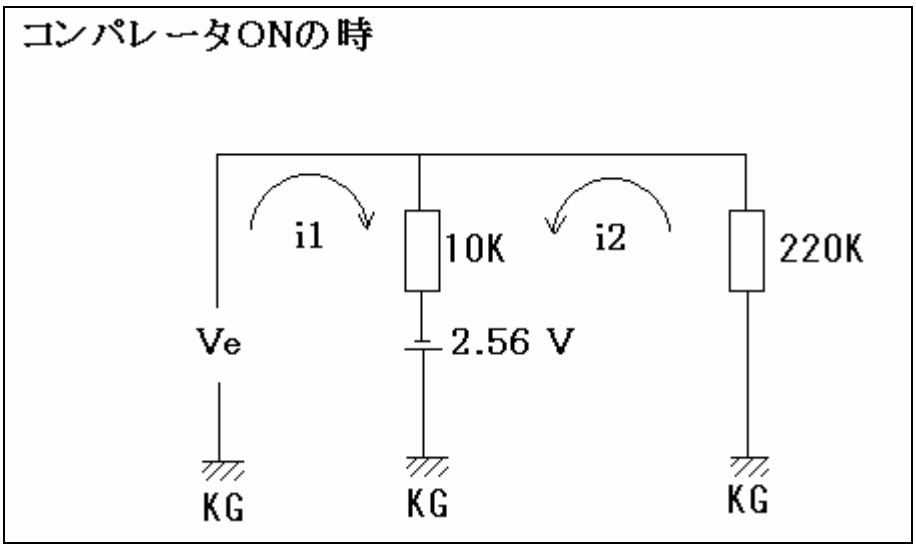


図.2-16 コンパレータ ON の回路図

$V = IP$の公式より

$$i2 = \frac{V}{R} \quad ・・・・・・ \quad (2)$$

$$2.56 + Ve = \frac{2.56}{220K + 10K} \times 10K ・・・・・・ \quad (3)$$

$$2.56 + Ve = 0.111$$

$$Ve = -2.46V ・・・・・ \quad (4)$$

図.2-16 はコンパレータ On で作動する回路を示した図である。図.2-15 に示した KN22 電源回路は今回の加工では電極に銅タングステンを使用するため、RN のコンデンサが On にならず、左半分 82Ω+150Ω+220Ωの回路しか使用しない。そこで(1)に示した計算式を求めることで回路内の電圧が 2.57V であるということが(1)の式を計算すると判断できる。そこで求めた電圧を回路内の電圧 2.57V とし、図.2-16 の式の中にある i1 回りと i2 回りの回路計算をおこなう。しかし Ve の電圧が分からないので、V=IR のオームの法則を用いて(2)のように i2 回りの電流を計算する。そこで求めた i2 の電流を今度は(3)のように i1、i2 と全体の回路計算をおこなう。全体の回路を計算すると Ve は 2.46V となる。コンパレータ On になる時の回路内の Ve は 2.46V でコンパレータが On になることがこの計算式より導き出せる。

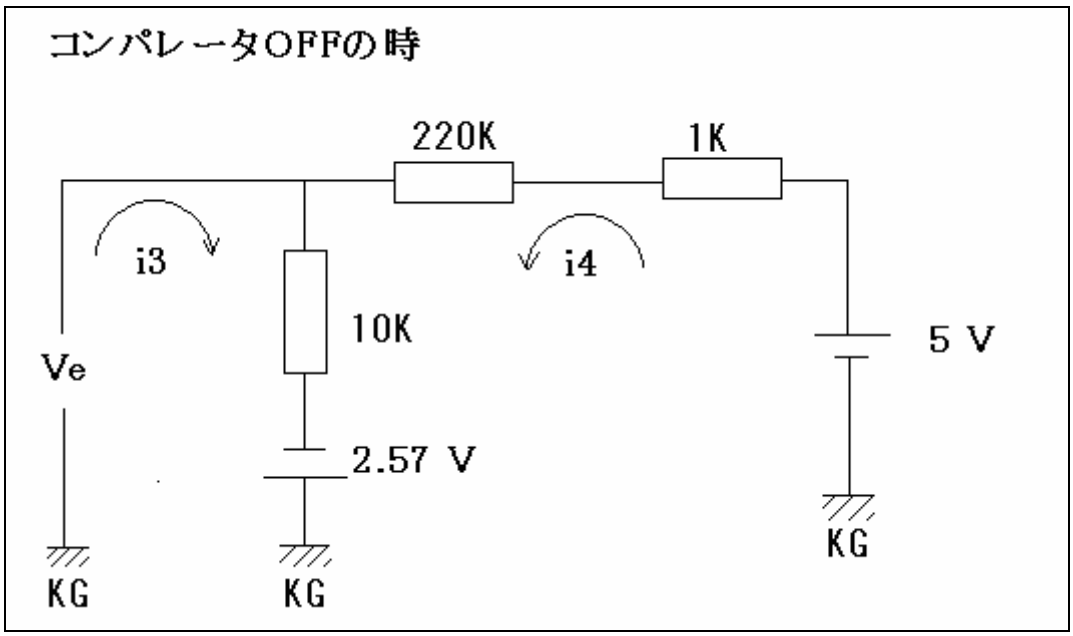


図.2-17 コンパレータ Off の回路図

$V = IR$の公式より

$$i4 = \frac{V}{R} \cdots\cdots \quad (5)$$

$$= \frac{2.57 + 5}{220K + 10K + 1K}$$

$$2.57 + Ve = \frac{2.57 + 5}{220K + 10K + 1K} \times 10K \cdots\cdots \quad (6)$$

$$2.57 + Ve = 0.327$$

$$Ve = -2.24V \cdots\cdots \quad (7)$$

図.2-17 はコンパレータ Off の場合の回路を示した図である。図.2-17 の回路より Ve の電圧が分からないので、V=IR のオームの法則を使い i4 を流れる電流を計算する。(5)は i4 回りの電流を求めた式になり、そこで求めた電流 i4 を(6)の式に代入し i1、i2 全体の回路を計算すると、Ve の電圧を求めることができる。(7)より求めた Ve の電圧は 2.24V となり、回路内の電圧 Ve が 2.24V になるとコンパレータが Off になることがこの計算結果より導き出せる。

極間電圧計算

$$\frac{220K+10K}{10K}\times X = Y \cdots\cdots \quad (8)$$

(4) と (7) の答えを (8) の式の$X$に代入

$$\frac{220k+10K}{10K}\times 2.46 = 56.58$$

$$= 57V \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (9)$$

$$\frac{220K+10K}{10K}\times 2.24 = 51.52$$

$$= 52V \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (10)$$

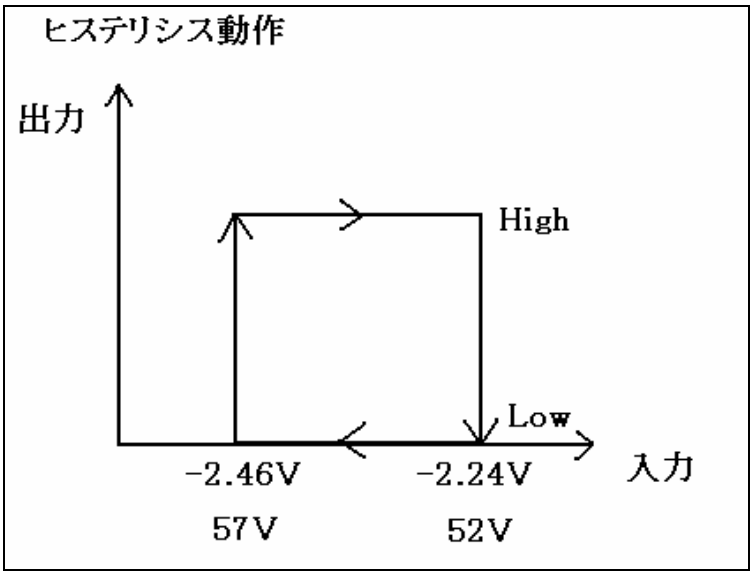


図.2-18 ヒステリシス動作

図.2-18 はヒステリシス動作(コンパレータ動作)を示した図になる。(8)は極間電圧を求める計算式になり、(4)と(7)求めた Ve の計算結果を(8)式 X に代入した値が実際にコンパレータ On,Off と変化する場合の電圧になる。(8)式 X に(4)と(7)を代入し計算すると、コンパレータ On になる時の電圧は 57V になりコンパレータ Off に変わる場合の電圧は 52V で放電検出されることが上の計算結果より判断できる。このように 57V でコンパレータが On になり、52V でコンパレータが Off になるヒステリシス動作では、極間電圧 60V まで電圧を下げることが可能である。このように上の計算結果より従来の電源回路では印加電圧 60V まで下げることが可能であるということが上の計算結果より分かる。しかし今回の研究では印加電圧を 50V まで下げて加工を行いたいため、従来の電源回路では不十分である。そこで次に、印加電圧を 50V まで電圧を下げるためには図.2-15 にある KN22 電源回路中にある 82Ω+150Ω+220Ω と直列につながっている抵抗の 220KΩの抵抗をどの程度変化すればよいかについての回路計算を行っていく。

極間印加電圧

$$\frac{220K+10K}{10K}\times X=50$$

$$X=2.17\text{・・・・・}\quad(11)$$

$KN22$電源回路より

$$\frac{82+150}{82+150+X}\times -5=2.17\text{・・・・・}\quad(12)$$

$$\frac{82+150}{0.434}=82+150+X$$

$$X=302\text{・・・・・}\quad(13)$$

(12)　の式$X$に　(13)　の計算結果を代入し計算を行うと　(14)　になる

$$\frac{82+150}{82+150+302}\times -5=-2.14V\text{・・・・・・}\quad(14)$$

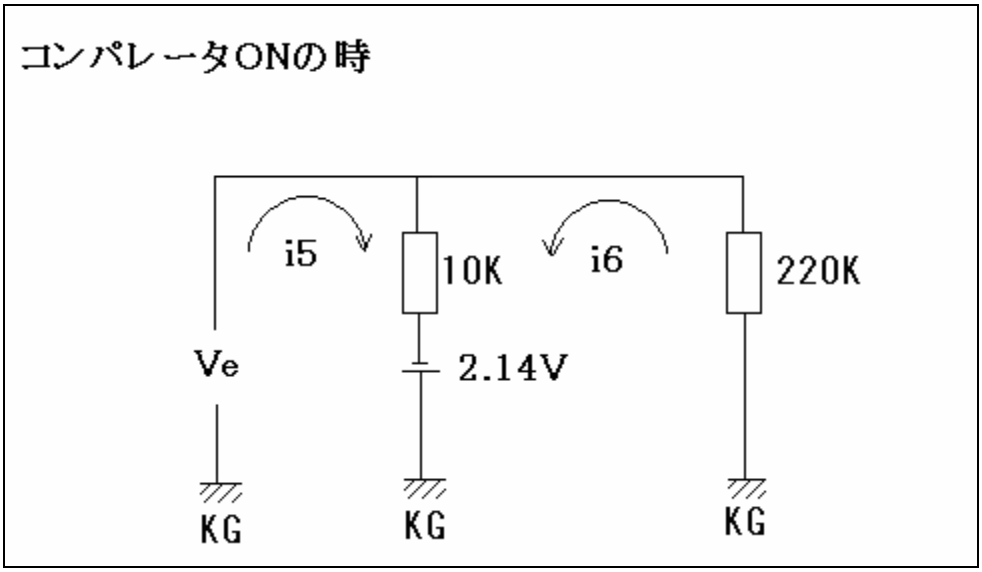


図.2-19 コンパレータ On の回路図

$V = IR$の公式より

$$i6 = \frac{V}{R} \cdots\cdots\cdots \quad (15)$$

$$= \frac{2.14}{220K + 10K}$$

$$2.14 + Ve = \frac{2.14}{220K + 10K} \times 10K \cdots\cdots \quad (16)$$

$$2.14 + Ve = 0.111$$

$$Ve = -2.04V \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (17)$$

極間電圧を 50V まで下げる場合、(11)の極間電圧計算式の X(コンパレータ On)内の電圧が分からないので逆算して X を求めると、(11)のように回路内の電圧は 2.17V となる。(11)の計算結果を(12)の式の X に代入して計算すると(13)になる。(13)の計算結果を(12)の X に代入し再計算すると(14)のように回路内の電圧は 2.14V になる。回路内の電圧を 2.14V と考え i5,i6 回りの電流を計算する。しかし Ve の電圧が分からないので、i6 回りの電流を V=IR のオームの法則で計算すると i6 回りの電流が(15)の計算式よりみちびきだせる。(15)で求めた電流を次の式に代入すると(16)のような式になる。(16)の式を計算していくと Ve は 2.04V と(17)の答えが出てくる。(17)の式より印加電圧 50V まで電圧を下げる場合、コンパレータ On の時には回路内の電流は 2.04V でコンパレータが On になることが上の計算結果より判断できる。

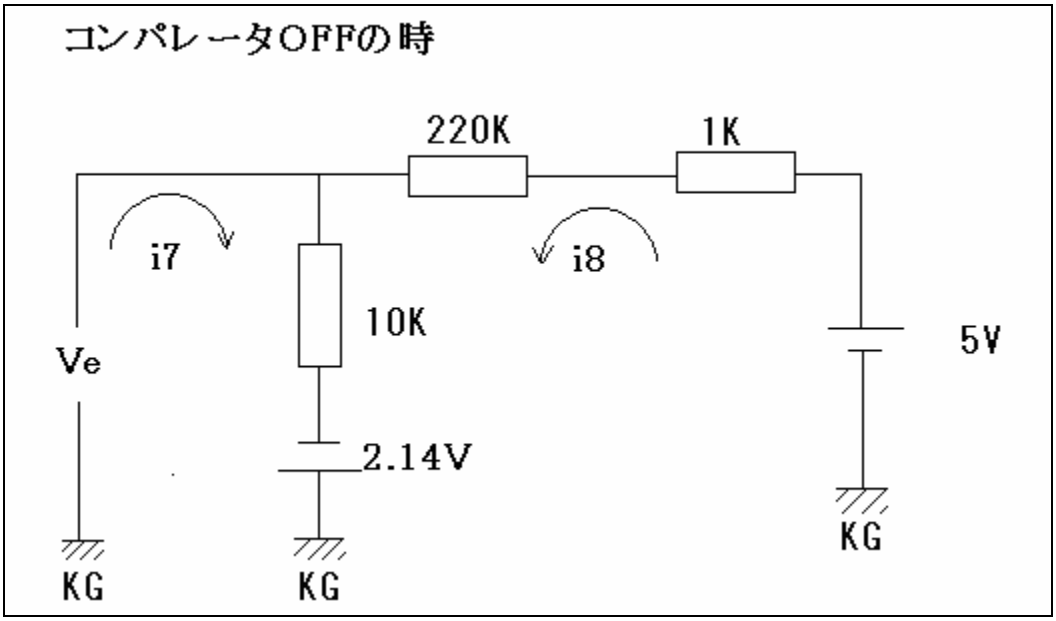


図.2-20 コンパレータ Off の回路図

$$V = IR$$

$$i8 = \frac{V}{R} \cdots\cdots\cdots \quad (18)$$

$$= \frac{2.14 + 5}{220K + 10K + 1K}$$

$$2.14 + Ve = \frac{2.14 + 5}{220K + 10K + 1K} \times 10K \cdots\cdots \quad (19)$$

$$2.14 + Ve = 0.327$$

$$Ve = -1.83V \cdots\cdots (20)$$

図.2-20 はコンパレータ Off の場合の回路を示した図である。コンパレータ Off の回路では Ve の電圧が分からないので、i8 回りの電流を V=IR のオームの法則で計算すると i8 回りの電流が(18)の計算式よりみちびきだせる。(18)で求めた電流を次の式に代入すると(19)の式になる。この(19)の式を計算していくと Ve は 1.83V と(20)の式になる。(20)の式より印加電圧 50V まで電圧を下げる場合、コンパレータ Off の回路内には 1.83V の電圧でコンパレータが Off になることが(20)の式から求めることができる。

極間電圧計算

$$\frac{220K+10K}{10K}\times X = Y \cdots\cdots\cdots \quad (21)$$

(17)　と　(20)Iの計算結果を　(21)　　に代入すると

$$\frac{220K+10K}{10K}\times 2.04 = 46.92$$

$$= 47V \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (22)$$

$$\frac{220K+10K}{10K}\times 1.83 = 42V \cdots\cdots\cdots \quad (23)$$

上の(22)と(23)の計算結果になる

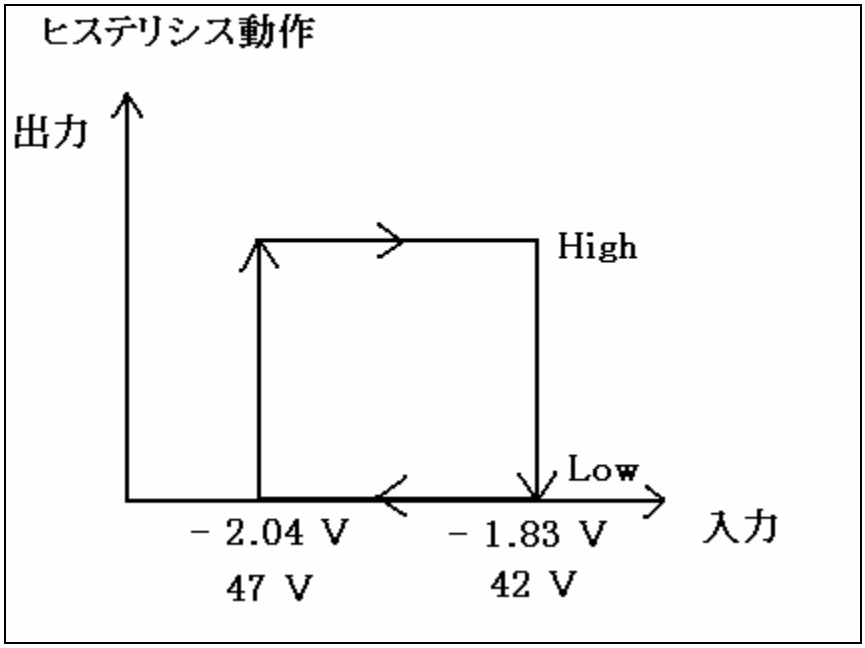


図.2-21 ヒステリシス動作

図.2-21 のヒステリシス動作は、コンパレータ On からコンパレータ Off になる場合の値、((17)と(20))より導き出した数値を(21)の式に代入し、(22)と(23)のように計算結果を図で示したものである。図.2-21 のヒステリシス動作図より、印加電圧を 50V まで下げるとコンパレータが 47V で On になり 42V まで電圧が下がるとコンパレータが Off になるということが上の図.2-23 より判断できる。この結果より、印加電圧を 50V まで下げる場合、図.2-17 の KN22 電源回路の 82Ω+150Ω+220Ωの直列になった抵抗の 220Ωに直列で 90Ωの抵抗を接続させることで 50V の電圧まで下げることが可能でることが上の計算結果より導き出せた。

# 4.加工方法及び加工条件

## 4－1.加工条件

今回の加工は電極に銅タングステン、工作物に超硬合金を用いるため表 2-10 に示すような加工条件で加工を行った。超硬合金はコバルトをバインダーとし、タングステンカーバイドを高温で焼結したものである。銅やタングステンなどを含むような、加工に必要とされる最低エネルギー密度の高い材料を放電加工する場合、低消耗加工は不可能とされている。そこで高いエネルギー密度の加工条件として、パルス幅 OnTime を短く、かつ電流値 Ip の高い条件を選ぶことで、低電極消耗にはならないが加工効率を高めることができるとされている。加工条件として回路は TP 回路で、極性は電極側を(－)ワーク側を(＋)とし、電流値は電流のピーク値で 35(A)、パルス幅は 8μsec と少しパルス幅の長い 32μsec の 2 つの条件で加工を行った。またパルス幅 8,32μsec 条件では休止時間を 32μsec にした。また印加電圧を 50、60、70、80V と 4 つの電圧に変化させ加工を行った。表 2-10 の条件は、三菱電機株式会社が推奨する加工ノウハウシートを参考に自分たちでパルス幅や休止時間を変化させてこのような条件を導き出したものである。

表 2-10　加工条件

| パラメータ | 単位 | |
|---|---|---|
| 回路(ES) | | TP |
| 補助電源(AUX) | | 0 |
| 極性切替(POL) | | - |
| 電流ピーク値(Ip) | A | 35 |
| パルス幅(ONTime) | μsec | 8, 32 |
| 休止時間(OFFTime) | μsec | 32 |
| F 回路(GAP) | | 10 |
| 放電安定(JUMP) | | 1 |
| 上昇距離(JUMP UP) | | 5 |
| 下降距離(JUMP DOWN) | | 3 |
| コンデンサ切替(PCON) | | 0 |
| 加工調整(GAIN) | | 80 |
| サーボ電圧(SV) | V | 0 |
| OP 感度(OP) | | 0 |

## 4－2.加工方法

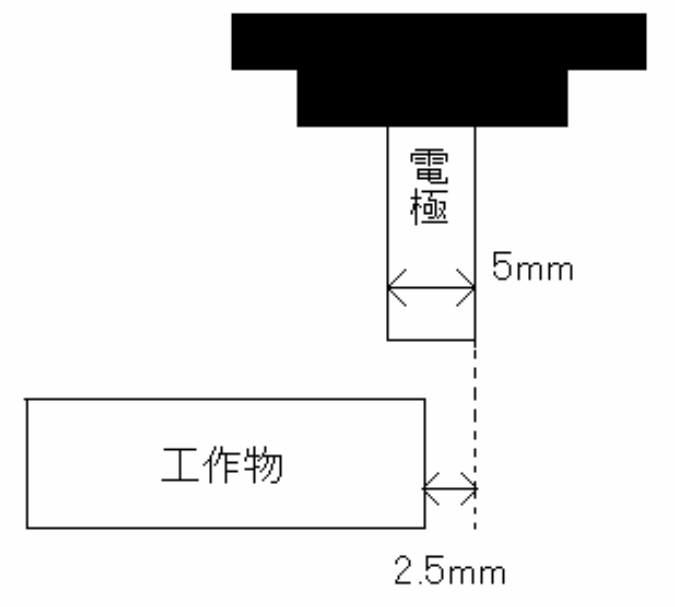


図.2-22　加工方法

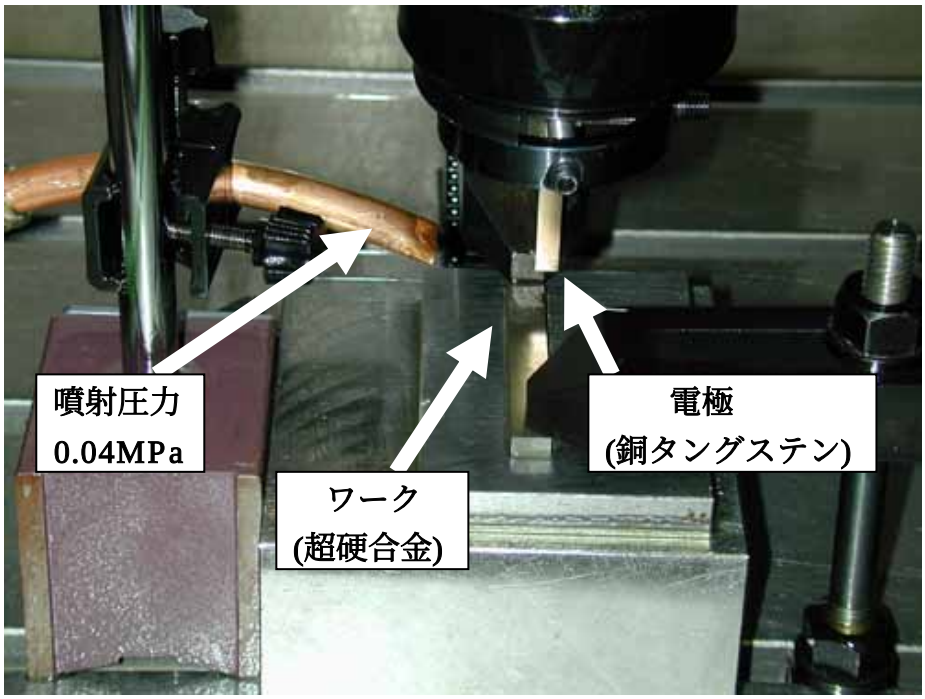


図.2-23　噴射装置の写真

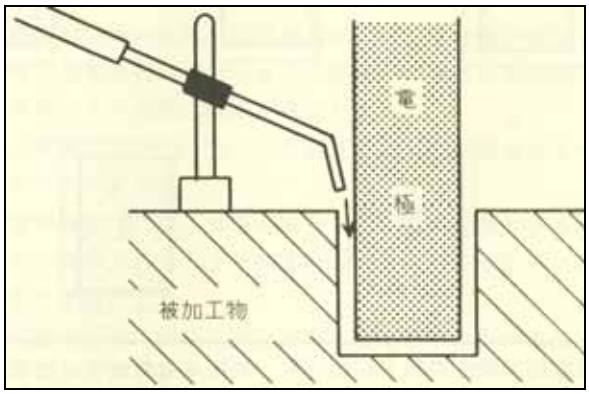

図.2-24　噴射法

加工方法として、電極は 5×5mm とあらかじめワイヤカット放電加工機(図.2-7 に示す)でカットしたものを使用し、電極とワークの端面位置決めは図.4-1 に示すように工作物(超硬合金)に対して電極(銅タングステン)を 2.5mm の片掛け加工を行った。このように片掛け加工したのは、加工屑(以後、スラッジ)がたまりにくく加工が安定しやすいためである。

今回の研究では印加電圧を 80、70、60、50V と電圧を下げて加工を行う。印加電圧を下げると電極と工作物の距離(以後、極間距離)が狭くなるためスラッジの排出効率が悪くなる。スラッジが極間にたまると、その特定の位置だけに放電が集中する(以後、集中放電)。パルス幅 OnTime を短く電流値 Ip の高い加工条件で加工を行うと、非常に加工が不安定になり集中放電が起こりやすくなる。印加電圧を下げかつパルス幅を短く電流値の高い加工条件でも集中放電しないようなスラッジの排出処理が必要になってくる。スラッジ処理には、噴出法、吸引法、噴射法と 3 種類の方法があるが、今回は図.2-24 に示すような噴射法を用いた。この噴射液圧は片掛け加工の場合(加工面積 2.5×5mm)は 0.04～0.06MPa、サンプル加工(電極面積 5×5mm)の場合は 0.1MPa の噴射圧力で加工を行った。

## 5 .測定方法及び測定結果
### 5－1.電極の測定方法

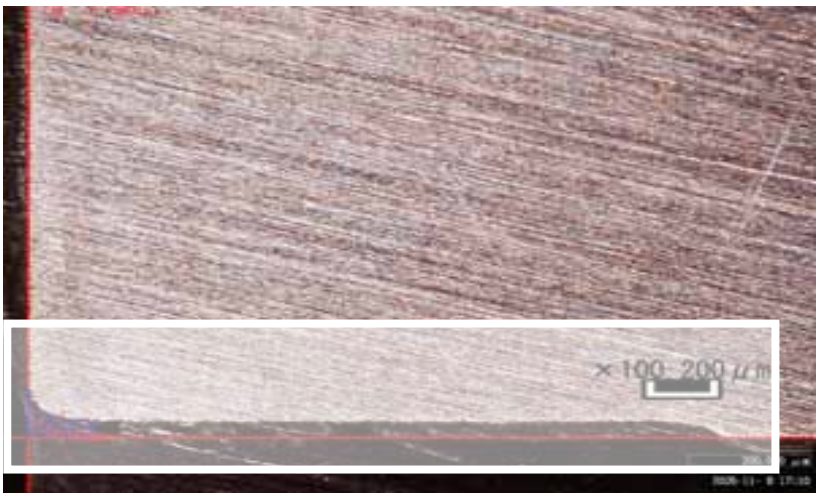


図.2-25　加工後の電極形状(全体図)

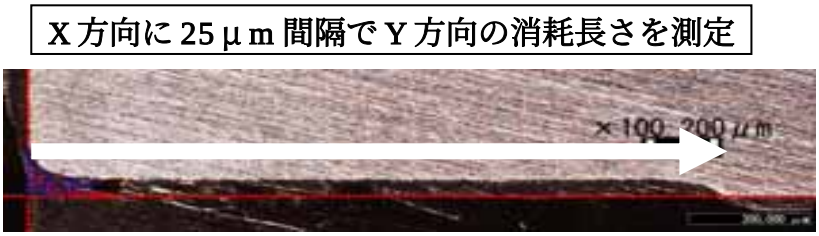


図.2-26　測定方法

電極の測定方法として、図.2-8 に示す 3 次元デジタルファインスコープを使用し、図.2-25 に示すように加工後の電極断面を 100 倍に拡大し、図.2-25 の白線で囲んだ部分を図.2-26 のように X 方向に 25μm 間隔で Y 方向の消耗長さを測定しながらデータを取り、その測定データを Excel でグラフ化し電極の消耗長さとし考察していく。

## 5－2.測定結果

パルス幅 8μsec の条件で印加電圧を変化させ 1mm 加工後の電極消耗形状

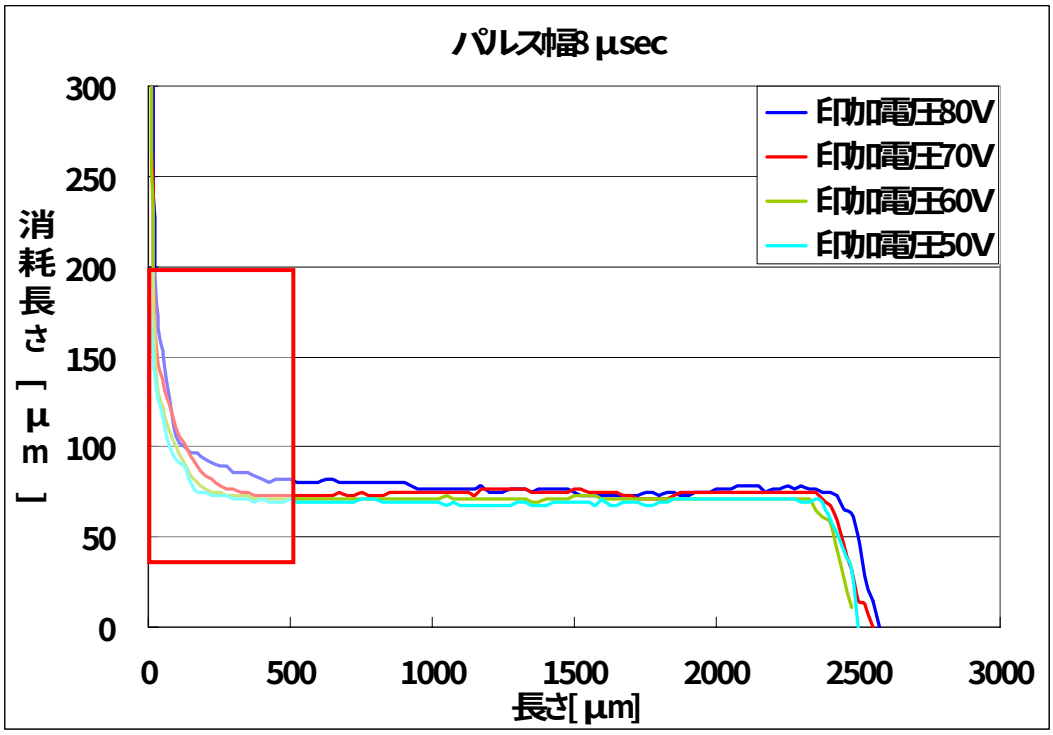


図.2-27　印加電圧を変化させた時の電極形状グラフ

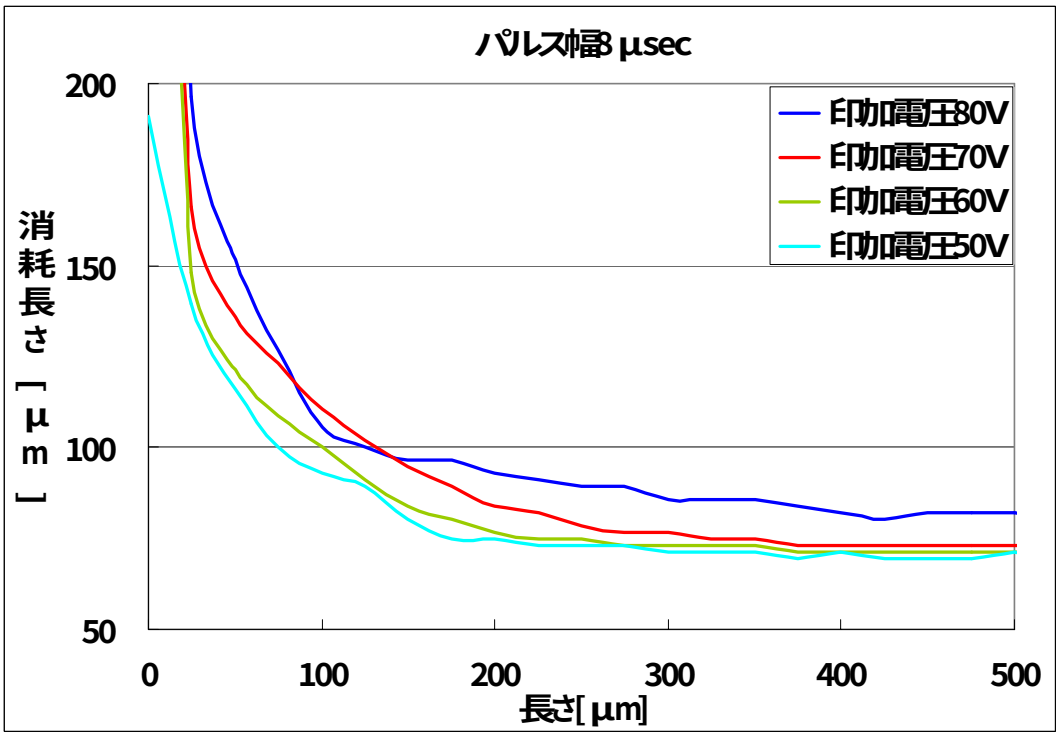


図.2-28　コーナー部分を拡大したグラフ

・パルス幅 8μsec の条件での加工後の電極消耗形状の考察

図.2-27 はパルス幅 8μsec の条件で加工後の電極消耗形状を示したグラフである。このグラフは横方向が長さ単位[μm]、縦方向が電極消耗長さ単位[μm]となっており、印加電圧を 80、70、60、50V と 4 つの条件に電圧を変化させた時の加工後の電極消耗形状を示したものである。パルス幅 8μsec の条件で 1mm 加工後の電極消耗形状は、印加電圧 50、60、70V の電圧では加工後のコーナーR 形状の差はほとんど見られないが、印加電圧を 80V にするとコーナーR 部分の消耗が激しくなっていることが図.2-27 のグラフより判断できる。この図.2-27 のグラフからでは印加電圧 50、60、70V と電圧を変化させてもコーナーR 形状消耗に差は見られないので、図.2-27 の四角で囲んだコーナー部分を拡大したグラフを次の図.2-28 示す。図.2-28 のグラフを見ると、印加電圧を 50、60、70、80V と電圧を高くするにつれコーナーR 消耗形状は増加傾向になっていることがグラフより判断できる。図.2-27、図.2-28 の結果よりパルス幅 8μsec の条件で印加電圧を 50、60、70、80V と変化させると電圧が高い 80V の条件より 70、60、50V と電圧を低くするにつれコーナー形状は減少傾向になっていることが上のグラフより判断できる。

パルス幅 8μsec の条件で印加電圧を変化させ 1mm 加工後のワーク断面形状

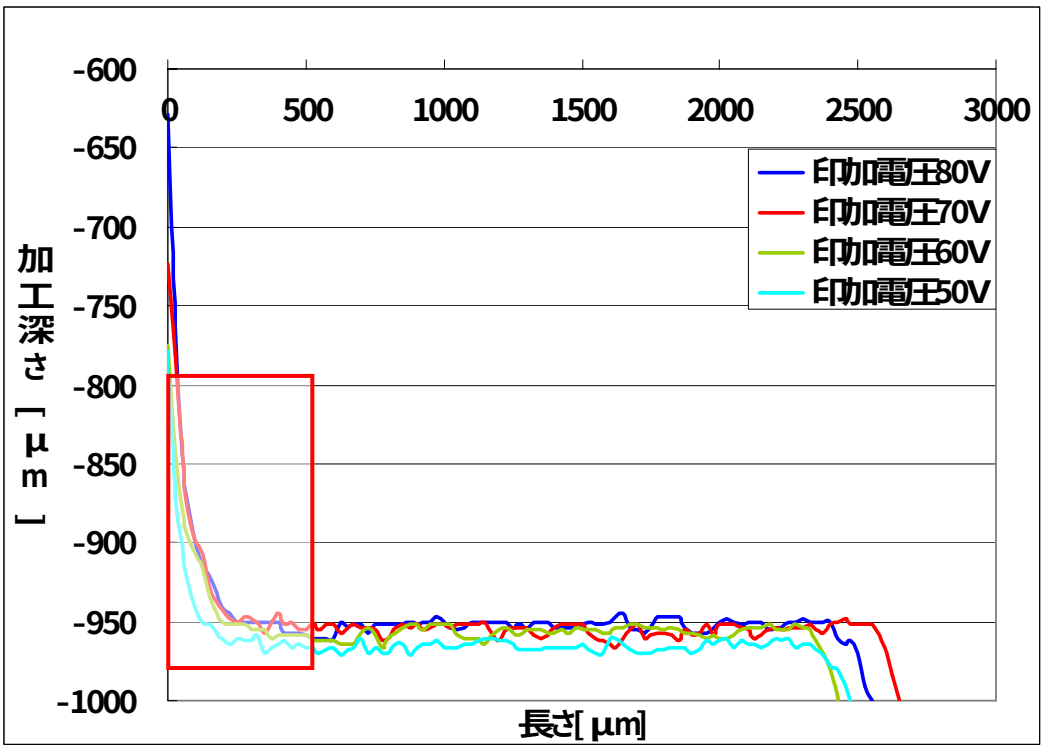


図.2-29　加工後のワーク断面形状グラフ

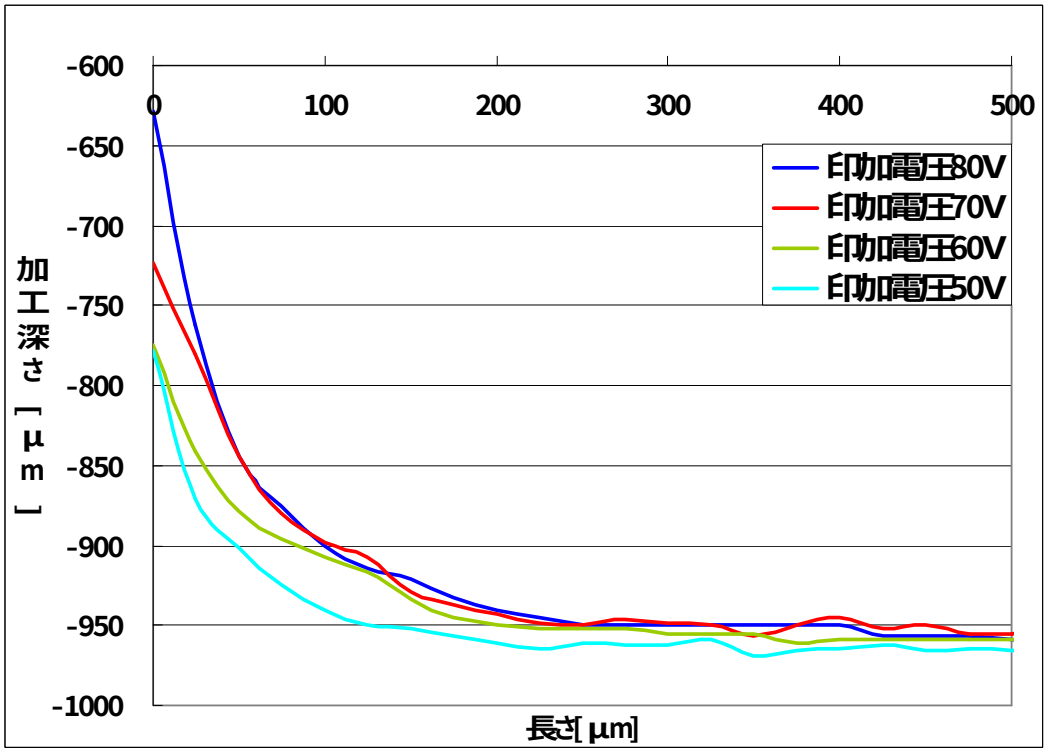


図.2-30　コーナー部分を拡大したグラフ

・パルス幅 8μsec の条件での加工後のワーク断面形状の考察

図.2-29 はパルス幅 8μsec の条件で印加電圧を 50、60、70、80V と変化させ 1mm 加工後のワークの加工深を示したグラフである。このグラフは横軸に長さ単位が[μm]、縦軸に加工深さ単位が[μm]としグラフ化したものであり、加工深さが Z-1000μm に近いほど深くまで加工されていることになる。パルス幅 8μsec の条件で印加電圧を変化させ Z-1000μm まで加工すると、印加電圧 80、70V では Z-950μm とワークの加工深さにさほど変化が見られないが、印加電圧 60V になるとおよそ Z-960μm、さらに電圧を 50V まで下げると Z-975μm と深くまで加工できることが上のグラフより判断できる。またコーナーR 部分の加工形状も印加電圧 60、70、80V はほとんどコーナー部分の加工形状に変化は見られないが、印加電圧を 50V まで下げるとコーナーR が小さくなっていることが上の図.2-29 のグラフより判断できる。図.2-29 で示したグラフの四角で囲んだコーナー部分を拡大したグラフを図.2-30 に示す。このグラフを見ると印加電圧 80、70、60、50V と電圧を下げると印加電圧 80V はコーナーのスタート地点が Z-625μm と浅い位置からコーナー形状が始まっているが 70V になると Z-725μm、さらに電圧を下げていき 60、50V になると Z-770μm と電圧を下げるにつれてコーナーR のスタート位置が下方向に深くスライドしていることが分かる。この結果より、電圧を低くしていくにつれ深くまで垂直にほりこむことができる。また印加電圧を下げるにつれワークのコーナーR も減少することが図.2-30 のグラフより判断できる。

パルス幅 8μsec で 1mm 加工後の体積消耗率

表 2-11 印加電圧を変化させ 1mm 加工後の電極の消耗量とワーク加工量

| | 印加電圧 50V | 印加電圧 60V | 印加電圧 70V | 印加電圧 80V |
|---|---|---|---|---|
| 電極消耗量(g) | 0.0124 | 0.0134 | 0.014 | 0.0143 |
| ワーク加工量(g) | 0.151 | 0.163 | 0.173 | 0.173 |

表 2-12 電極(銅タングステン)、ワーク(超硬合金)の比重

| | 材料名 | 比重 |
|---|---|---|
| 銅タングステン | NEL150 | 13.2 |
| 超硬合金 | G5 | 14.2 |

体積消耗率の計算式

$$\text{体積消耗率} = \frac{\text{電極消耗量(ワークの加工量)}}{\text{比重}(g/cm3)} \quad \cdots\cdots (24)$$

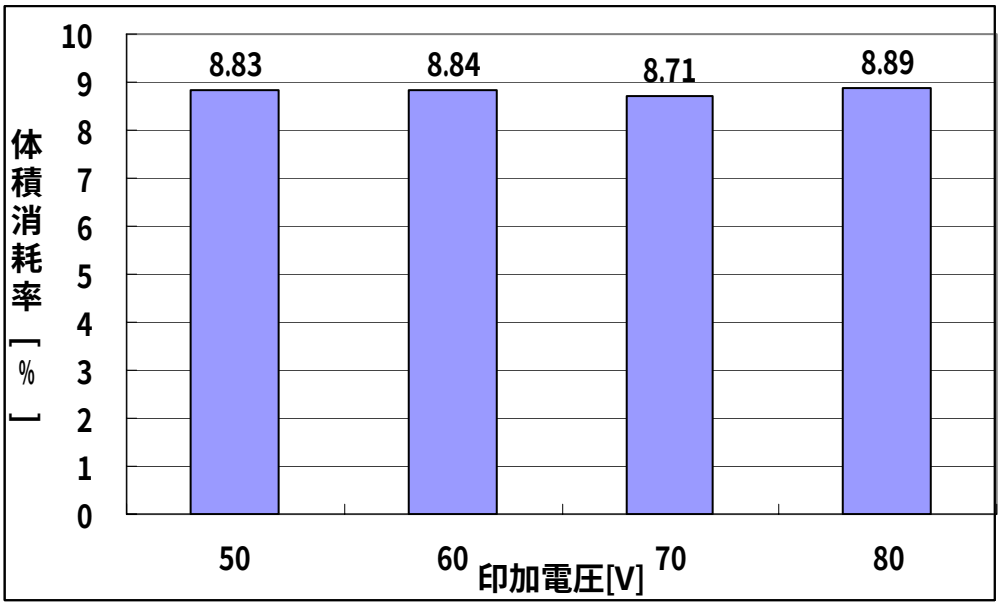


図.2-31 印加電圧を変化させ 1mm 加工後の体積消耗率

パルス幅 8μsec の条件で 1mm 加工後の体積消耗率の考察

図.2-31 のグラフはパルス幅 8μsec の条件で 1mm 加工後の電極消耗量とワーク加工量(表 2-11)を(24)式に代入し電極とワークそれぞれの体積消耗率を計算し、その計算結果を電極÷ワークとし全体の体積消耗率としたグラフである。このグラフは縦軸に体積消耗率[%]、横軸に印加電圧[V]となっており、パルス幅 8μsec の条件で 1mm 加工後の体積消耗率は、印加電圧を 50V～80V と変化させて 8.8 パーセント程度とほとんど体積消耗率に差が見られないことが図.2-31 より分かる。

パルス幅 32μsec の条件で印加電圧を変化させ 1mm 加工後の電極断面形状

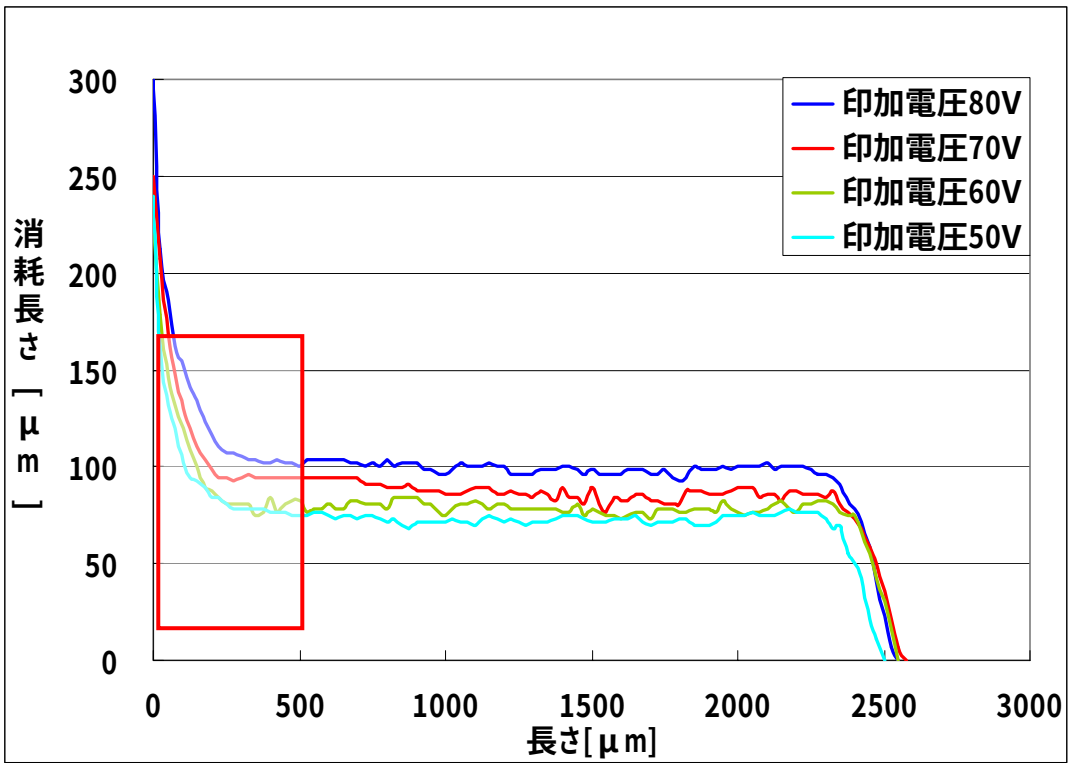


図.2-32　印加電圧を変化させた時の電極形状グラフ

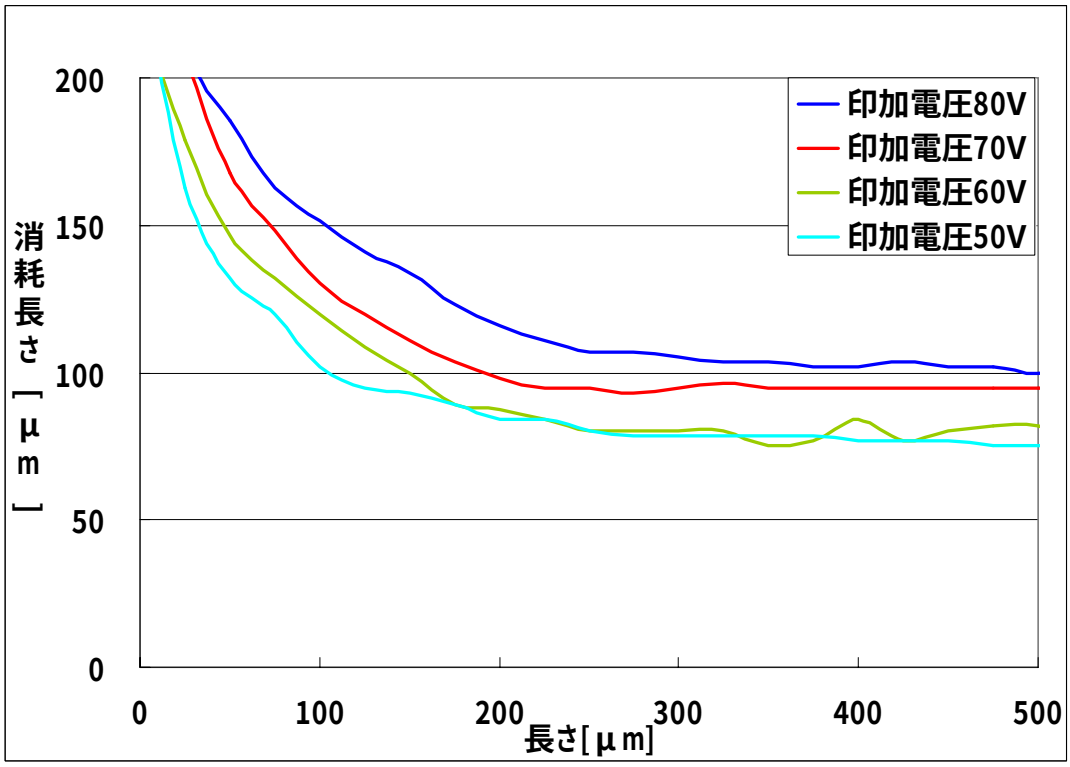


図.2-33　コーナー部分を拡大したグラフ

・パルス幅 32μsec の条件での加工後の電極断面形状の考察

図.2-32 はパルス幅 32μsec と少しパルス幅の長い条件で加工後の電極消耗形状を示したグラフである。このグラフは横方向が長さ単位[μm]、縦方向が電極消耗長さ単位[μm]となっており、印加電圧を 80、70、60、50V と 4 つの条件に電圧を変化させた時の加工後の電極形状消耗を示したものである。パルス幅 32μsec の条件で 1mm 加工後の電極消耗形状は、印加電圧 80V の条件では消耗長さが 100μm なのに対し電圧を 70V にすると消耗長さも 80～90μm、60V では 75～80μm、さらに電圧を下げ印加電圧 50V まで下げると消耗長さはおよそ 60～70μm と電圧を低くするにつれて電極消耗長さは減少傾向になっていることが上のグラフより判断できる。またコーナー部分も印加電圧を 80～50V へと下げるにつれてコーナー部分の消耗形状も減少していることが図.2-32 のグラフより判断できる。コーナー部分を分かりやすくするために図.2-32 の四角で囲んだコーナー形状を拡大すると、図.2-33 のようになる。印加電圧 80V と 50V を比較すると、コーナー形状は数μm も形状に差が出ることが図.2-33 のグラフより判断できる。パルス幅 32μsec と少しパルス幅の長い条件で加工後の消耗形状も印加電圧を 80、70、60、50V と電圧を低くするにつれ電極消耗形状を少なく加工することができることが分かる。

パルス幅 32μsec の条件で印加電圧を変化させ 1mm 加工後のワーク断面形状

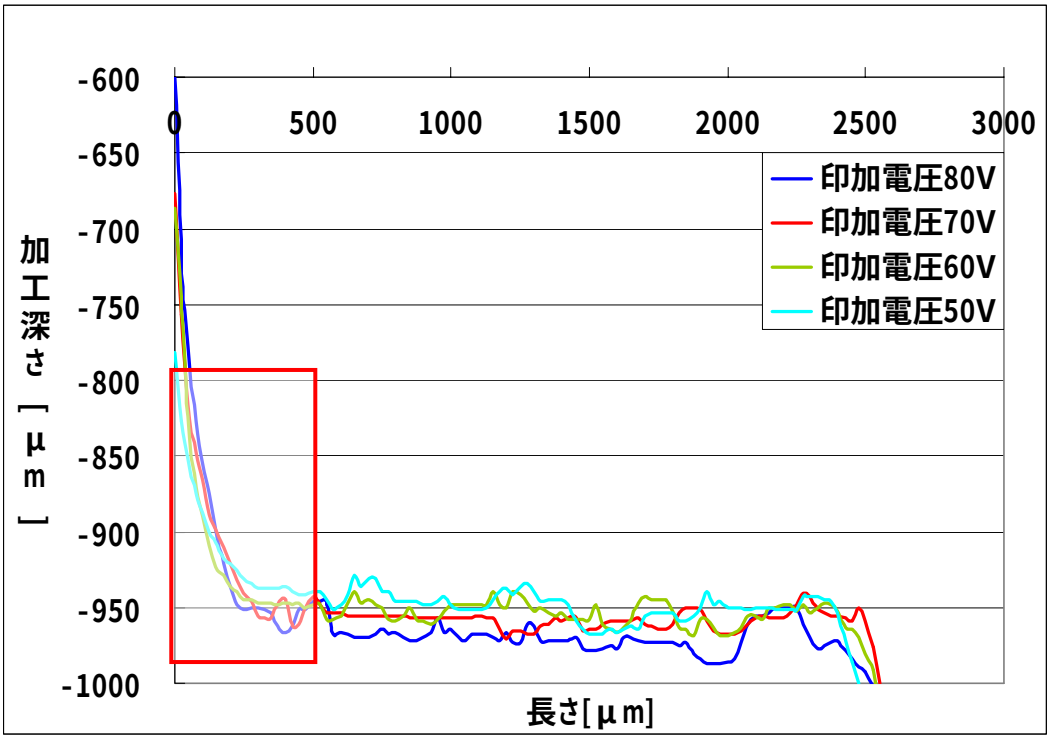


図.2-34　加工後のワーク断面形状グラフ

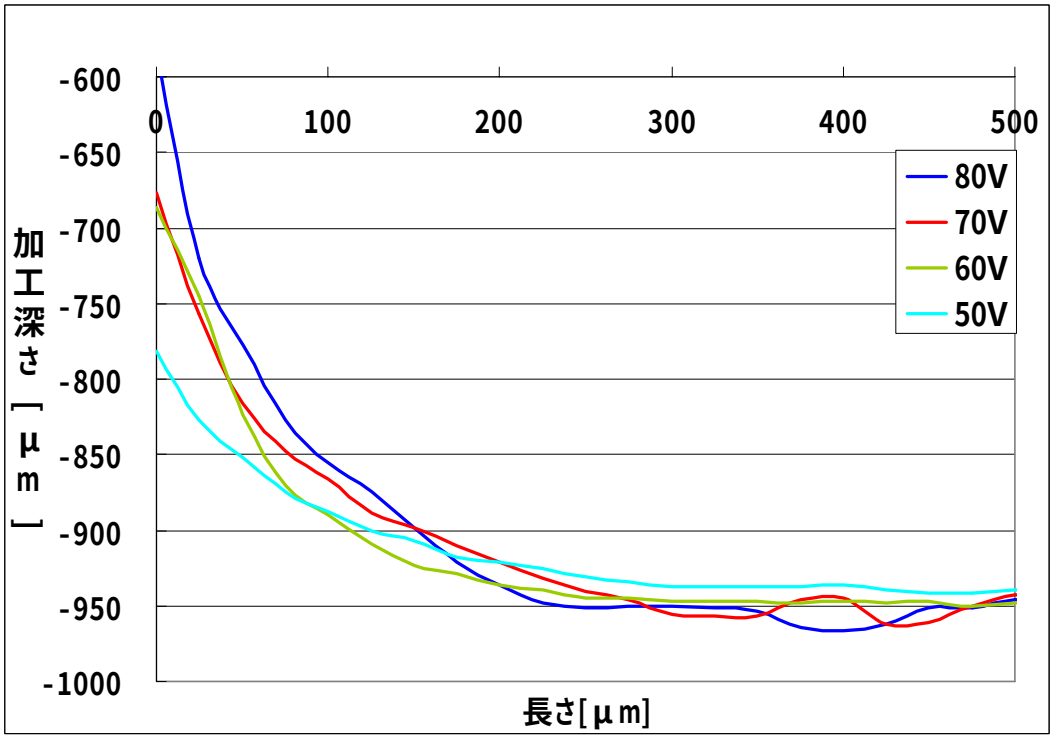


図.2-35　コーナー部分を拡大したグラフ

・パルス幅 32μsec で加工後のワーク加工深さからの考察

図.2-34 はパルス幅 32μsec の条件で印加電圧を 50、60、70、80V と変化させ 1mm 加工後のワーク断面形状を示したグラフである。このグラフは横軸に長さ単位が[μm]、縦軸に加工深さ単位が[μm]としグラフ化したものである。パルス幅 32μsec と少しパルス幅の長い条件で印加電圧を変化させ加工すると、印加電圧 80V では加工深さが Z-970μm に対し、70V、60V は Z-960μm、さらに印加電圧を 50V まで下げると加工深さ Z-950μm と、印加電圧を下げるにつれて深くまで加工できることがこのグラフより判断できる。図.2-34 のコーナーR 部分を拡大したグラフを図.2-35 に分かりやすく示す。パルス幅 32μsec でも電圧を下げるにつれコーナーR 形状も小さくなり、印加電圧 80V より 50V のコーナー形状が小さく加工できることが図.2-35 のグラフより判断できる。

パルス幅 32μsec で 1mm 加工後の体積消耗率

表 2-13 印加電圧を変化させ 1mm 加工後の電極の消耗量とワーク加工量

| | 印加電圧 50V | 印加電圧 60V | 印加電圧 70V | 印加電圧 80V |
|---|---|---|---|---|
| 電極消耗量 | 0.0136 | 0.0161 | 0.0177 | 0.0186 |
| ワーク消耗量 | 0.1643 | 0.1704 | 0.1784 | 0.1356 |

表 2-14 電極(銅タングステン)、ワーク(超硬合金)の比重

| | 材料名 | 比重 |
|---|---|---|
| 銅タングステン | NEL150 | 13.2 |
| 超硬合金 | G5 | 14.2 |

体積消耗率の計算式

$$\text{体積消耗率} = \frac{\text{電極消耗量(ワークの加工量)}}{\text{比重}(g/cm3)} \times 100 \cdots\cdots (25)$$

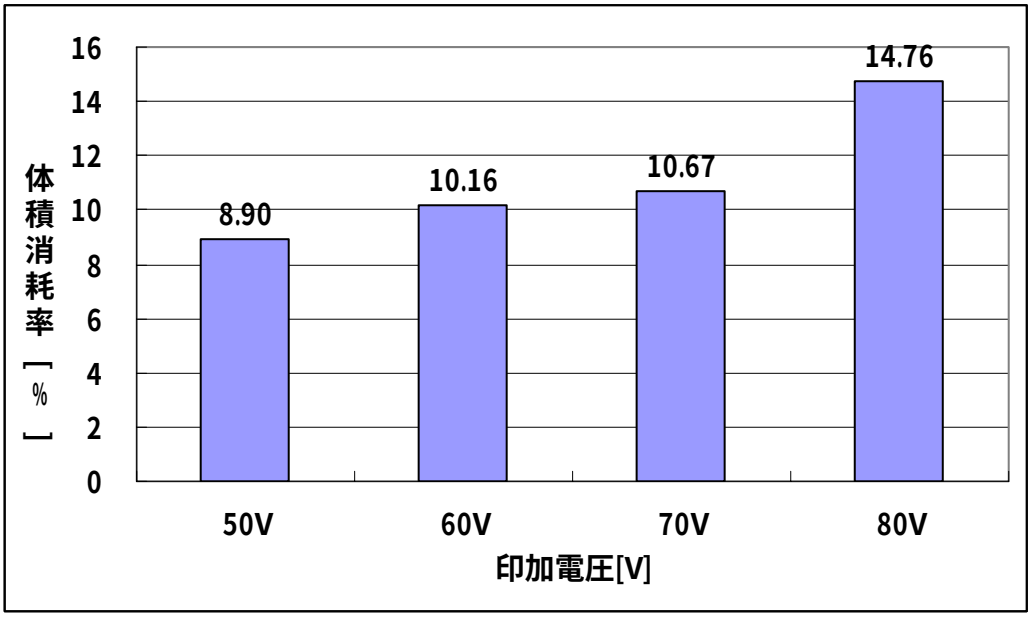


図.2-36 印加電圧を変化させ 1mm 加工後の体積消耗率

・パルス幅 32μsec の条件で 1mm 加工後の体積消耗率の考察

図.2-36 のグラフはパルス幅 32μsec の条件で 1mm 加工後の電極消耗量とワーク加工量(表 2-2)を(25)式に代入し電極とワークそれぞれの体積消耗率を計算し、その計算結果を電極÷ワークとし全体の体積消耗率としたグラフである。このグラフは縦軸に体積消耗率[%]、横軸に印加電圧[V]となっており、パルス幅 32μsec の条件で 1mm 加工後の体積消耗率は、印加電圧を 50～80V へと高くするにつれて体積消耗率が増加傾向になっていることが図.2-36 のグラフより分かる。

・パルス幅 8μsec で加工後の左コーナー部分の電極、ワークからの考察

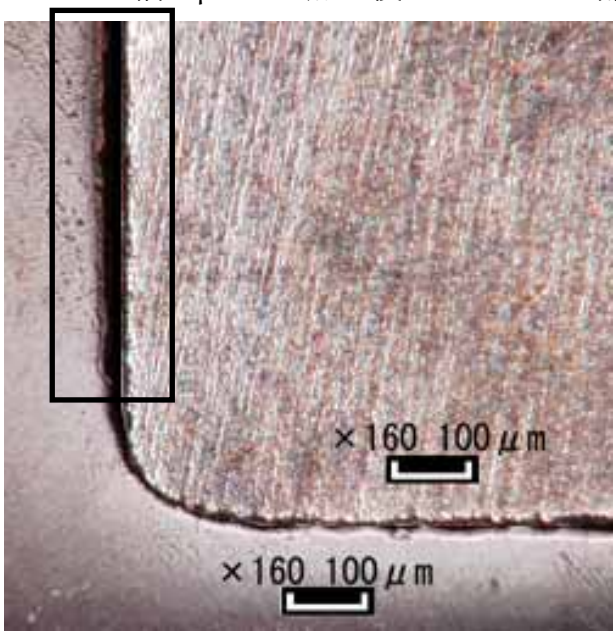


図.2-37　パルス幅 8μsec　印加電圧 50V

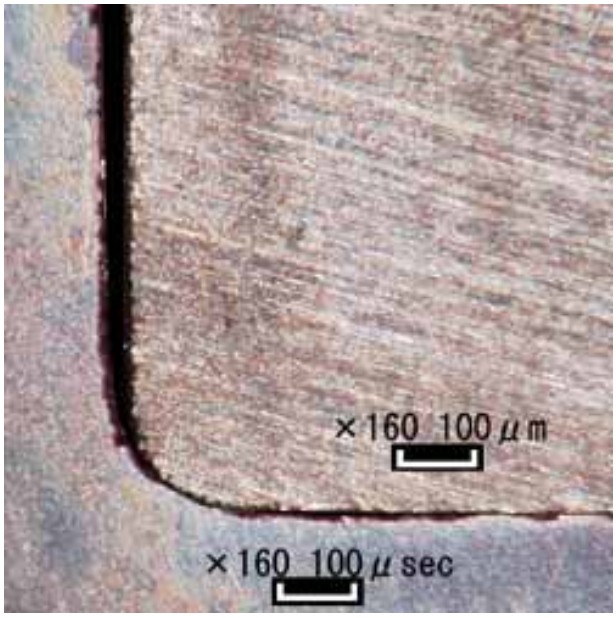


図.2-38　パルス幅 8μsec　印加電圧 60V

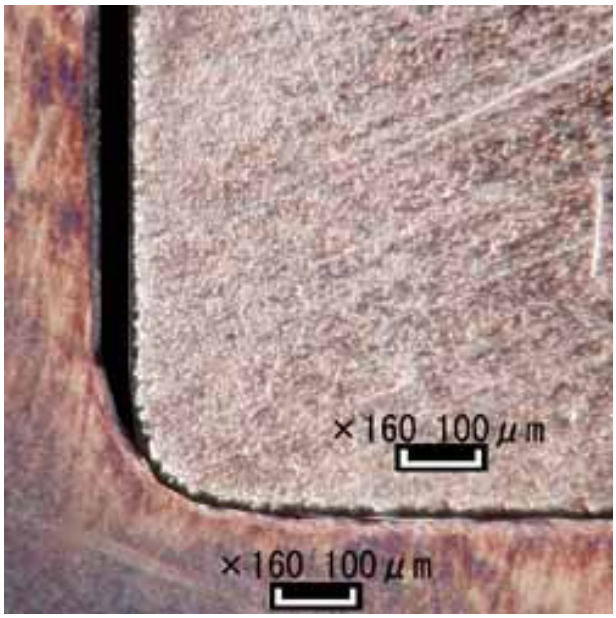


図.2-39　パルス幅 8μsec　印加電圧 70V

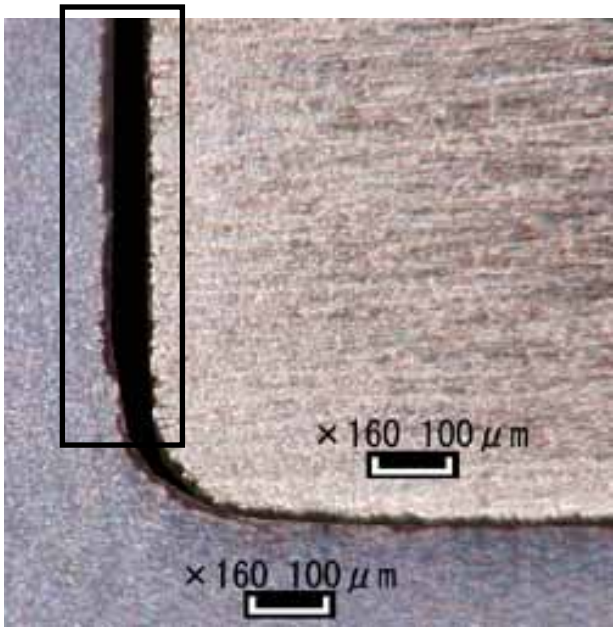


図.2-40　パルス幅 8μsec　印加電圧 80V

・顕微鏡写真からの考察

図.2-37 から図.2-40 の写真は、パルス幅 8μsec の条件で 1mm 加工後の電極とワークの断面写真を底面とコーナーR 部分で重ね合わせた写真である。この写真は図.2-8 に示すデジタル顕微鏡で 160 倍に拡大し、撮影したものである。パルス幅 8μsec の条件で印加電圧を 50、60、70、80V と電圧を高くすると、電極とワークのコーナー部分の消耗が増加するためこのように電極とワークを重ね合わせてみると、電圧を高くするにつれワーク側面にテーパーがついていることが分かる。印加電圧 50V と 80V を比較すると、電圧を高くするにつれ放電ギャップが大きくなる。その結果、電極消耗量が多くなると考えられる。電極消耗量が大きいとワークの加工精度が悪くなることが写真を見ると判断できる。この結果、パルス幅 8μsec の条件で印加電圧を 80V から 50V と電圧を低くするにつれ電極消耗が少なくなりワークコーナー部分が精度良く加工できることが分かる。

・パルス幅 32μsec で加工後の左コーナー部分の電極、ワークからの考察

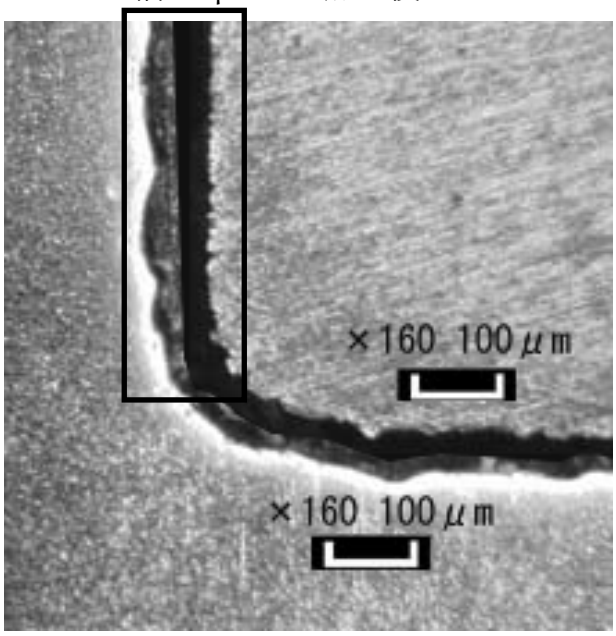


図.2-41　パルス幅 32μsec　印加電圧 50V

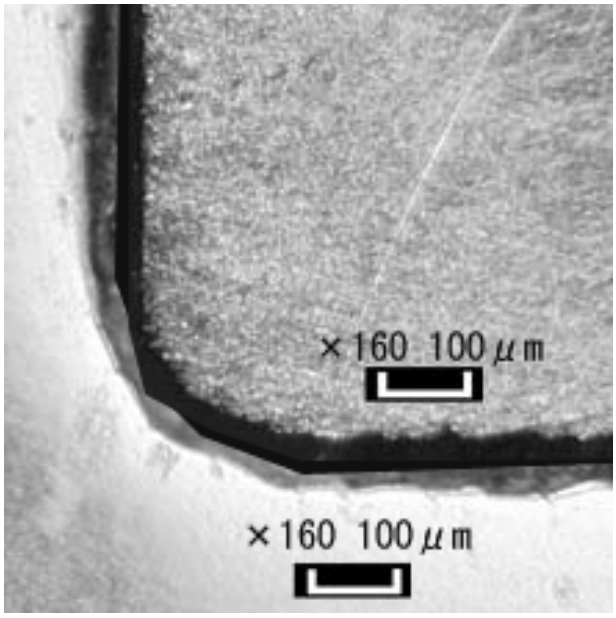


図.2-42 図　パルス幅 32μsec　印加電圧 60V

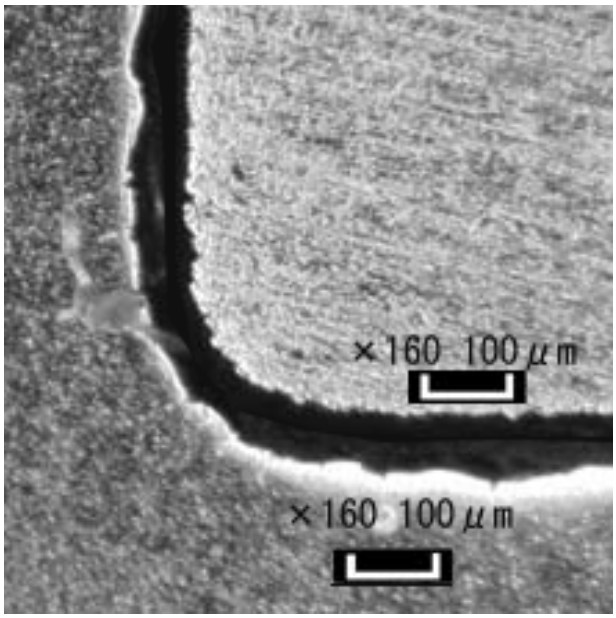


図.2-43　パルス幅 32μsec　印加電圧 70V

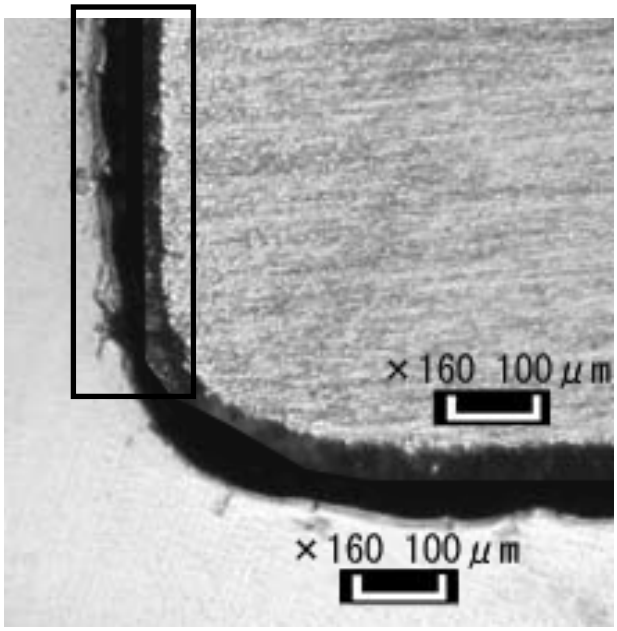


図.2-44　パルス幅 32μsec　印加電圧 80V

・顕微鏡写真からの考察

図.2-41 から図.2-44 の写真は、パルス幅 64μsec の条件で 1mm 加工後の電極とワークの断面写真を底面とコーナーR 部分で重ね合わせた写真である。この写真はデジタル顕微鏡で 160 倍に拡大し撮影したものである。パルス幅 32μsec の条件で印加電圧を 50、60、70、80V と電圧を高くすると、電極とワークのコーナー部分の消耗が増加するためこのように電極とワークを重ね合わせた写真からでも、電圧を高くするにつれ、ワークにテーパーがついていることが分かる。印加電圧 50V と 80V を比較すると印加電圧が高い条件では放電ギャップが大きくなるため電極消耗量が多くなると考えられる。電極消耗量が大きいとワークの加工精度が悪くなることが写真を見ると判断できる。その結果、パルス幅を少し長くした 32μsec の条件で印加電圧を 80V から 50V まで電圧を低くするにつれ電極消耗が少なくなるためワークコーナー部分も精度良く加工できることが分かる。

・パルス幅 8μsec で加工後の右コーナー部分の電極、ワークからの考察

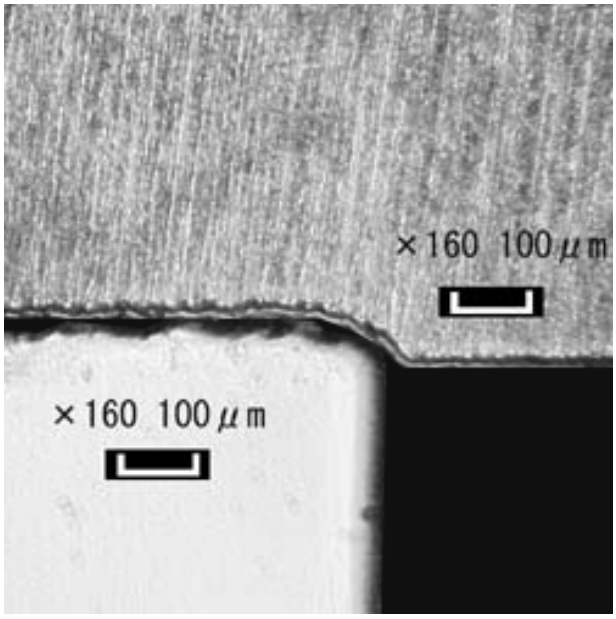


図.2-45　パルス幅 8μsec　印加電圧 50V

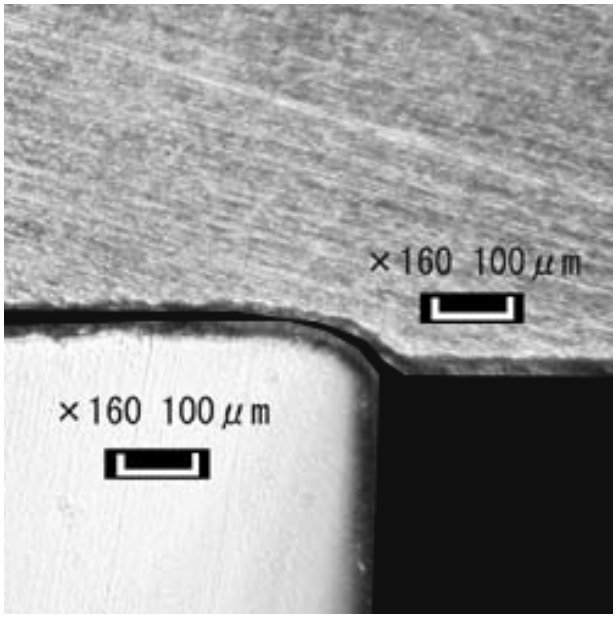


図.2-46　パルス幅 8μsec　印加電圧 60V

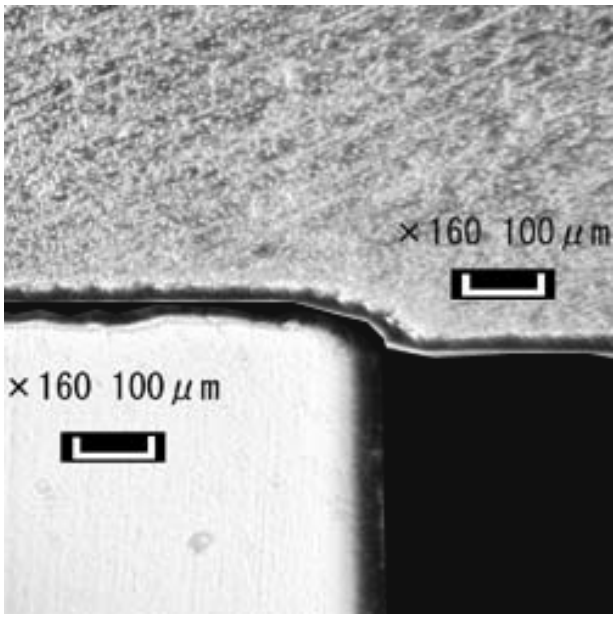


図.2-47　パルス幅 8μsec　印加電圧 70V

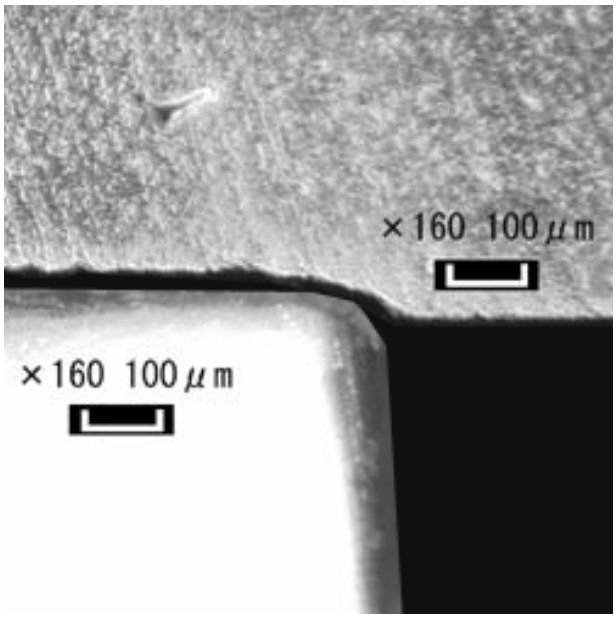


図.2-48　パルス幅 8μsec　印加電圧 80V

・顕微鏡写真からの考察

図.2-45 から図.2-48 の写真は、パルス幅 8μsec の条件で 1mm 加工後の右コーナー部分の電極とワークの断面写真を底面とコーナーR 部分で重ね合わせた写真である。この写真は 160 倍に拡大しデジタル顕微鏡で撮影したものである。パルス幅 8μsec で印加電圧 50V の条件では、ワークと電極のコーナー部分の消耗形状はさほど変化しない。しかし電圧を 60、70、80V と高くするにつれ電極消耗量が増加するため、加工後のワークコーナー形状にダレが発生していることが分かる。以上の結果より、右コーナー部分の電極消耗形状は印加電圧を 50V から 80V へと高くすると消耗量が増加するため、加工後のワークコーナー形状にダレが発生することが図.2-45 から図.2-48 の写真より判断できる。パルス幅 8μsec の条件でコーナーダレ形状を少なく加工する場合、印加電圧を出来るだけ小さくすれば放電ギャップが小さくなり、コーナー部分を精度良く加工することができると考えられる。

・パルス幅 32μsec で加工後の右コーナー部分の電極、ワークからの考察

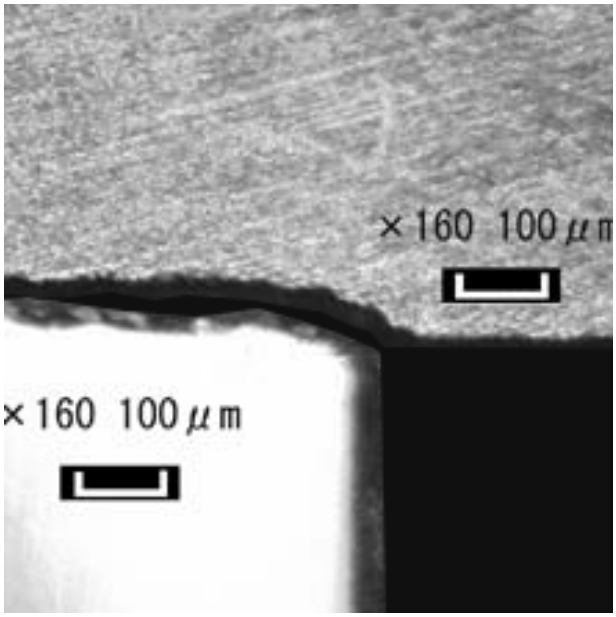


図.2-49　パルス幅 32μsec　印加電圧 50V

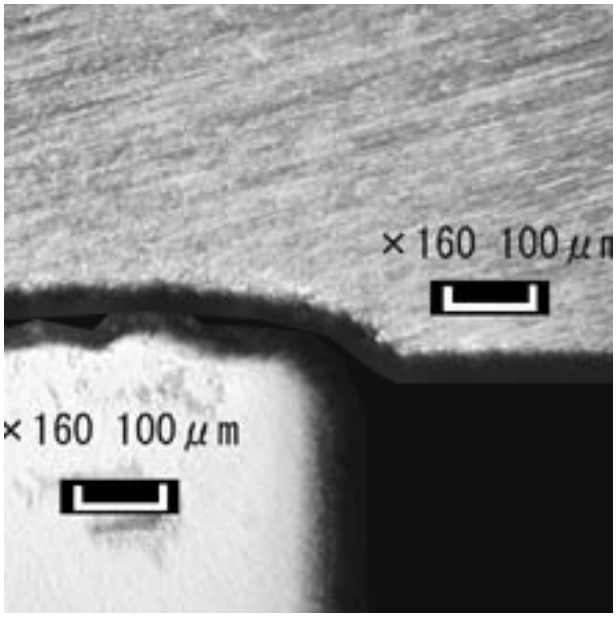


図.2-50　パルス幅 32μsec　印加電圧 60V

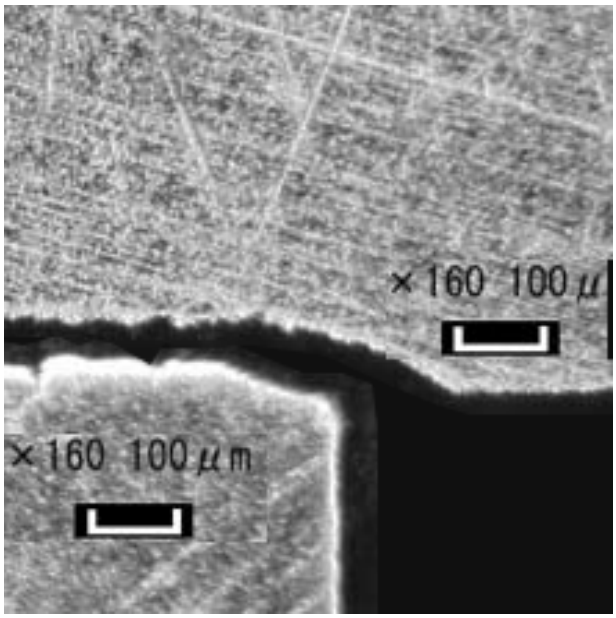


図.2-51 パルス幅 32μsec　印加電圧 70V

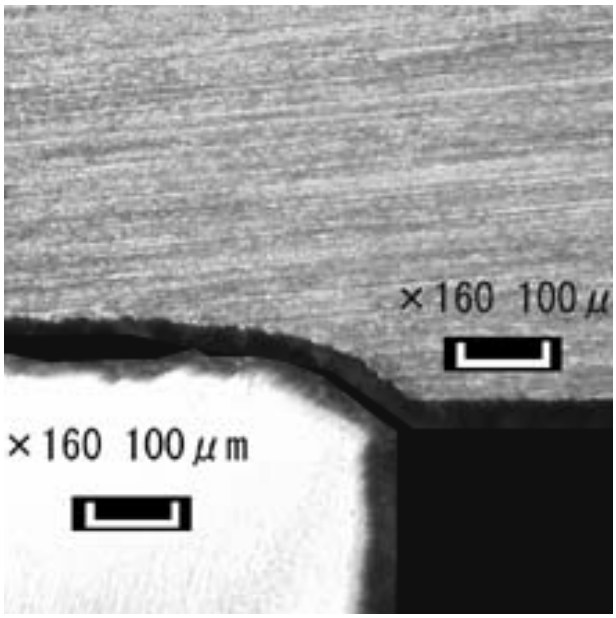


図.2-52 パルス幅 32μsec　印加電圧 80V

・顕微鏡写真からの考察

図.2-49 から図.2-52 写真は、パルス幅 32μsec と少しパルス幅を長くした条件で 1mm 加工後の右コーナー部分の電極とワークの断面写真を底面とコーナーR 部分で重ね合わせた写真である。この写真は 160 倍に拡大しデジタル顕微鏡で撮影したものである。パルス幅 32μsec と長くとった条件では、印加電圧 50V と電圧が低い条件でもコーナー部分にダレが発生していることが図.2-49 の写真を見ると分かる。さらに電圧を 60、70、80V と高くしていくとコーナー部分のダレも増加傾向になっていることが写真より判断できる。以上の結果よりパルス幅 32sec とパルスを長くした条件で 1mm 加工すると印加電圧 50V の条件からコーナー部分にダレが発生するため精度の良い加工はできないことが写真より判断できる。

・パルス幅 8μsec で加工後の電極コーナーR 写真

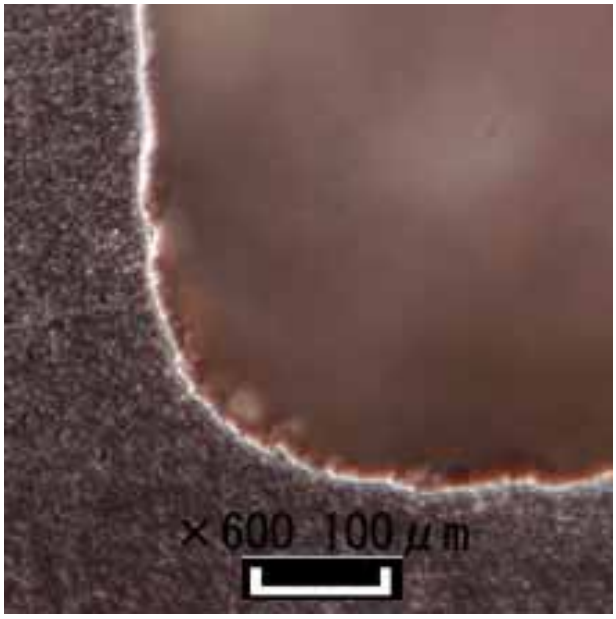


図.2-53　パルス幅 8μsec 印加電圧 50V

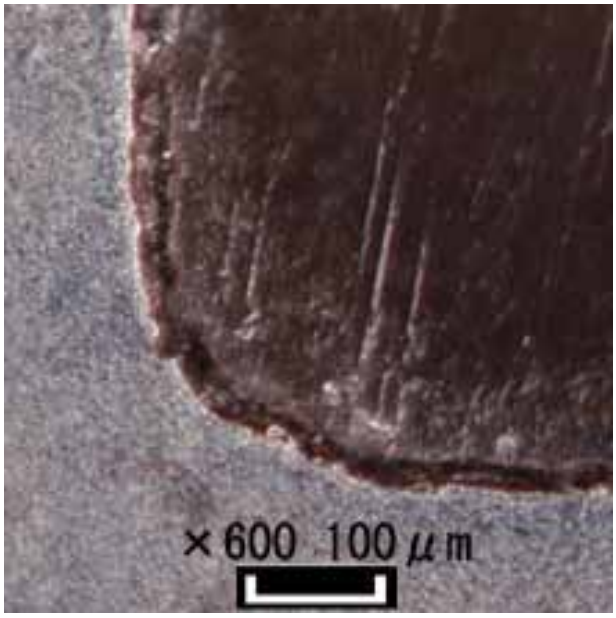


図.2-54　パルス幅 8μsec 印加電圧 60V

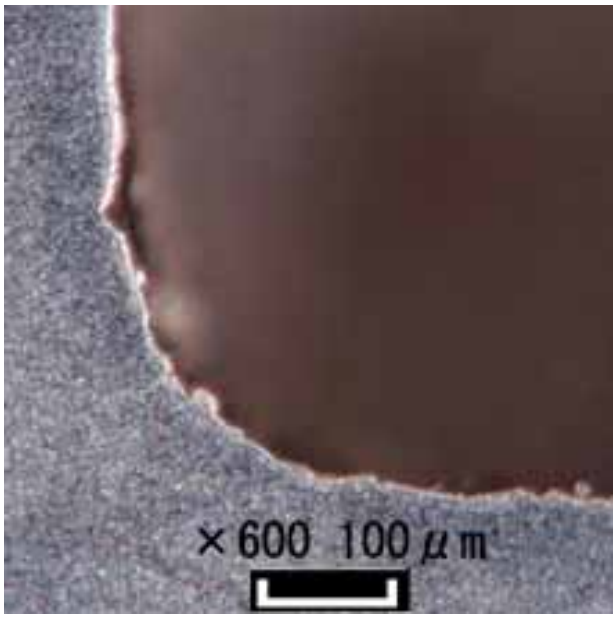


図.2-55　パルス幅 8μsec 印加電圧 70V

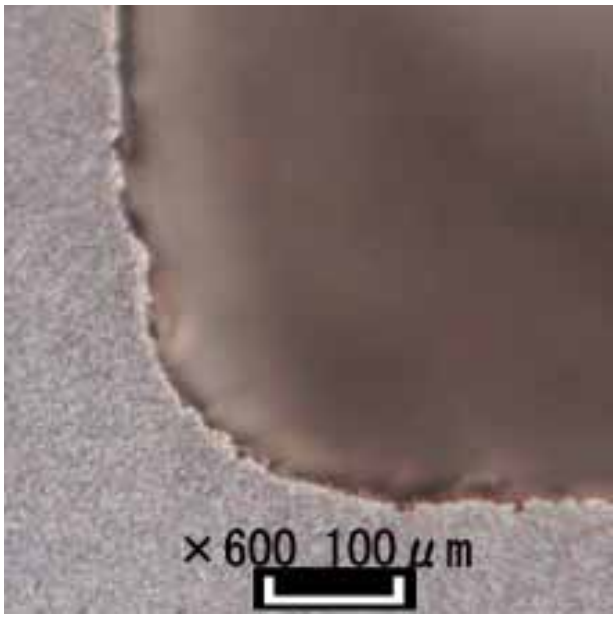


図.2-56　パルス幅 8μsec 印加電圧 80V

・顕微鏡写真からの考察

図.2-53 から図.2-56 写真は、パルス幅 8μsec の条件で 1mm 加工後のワークのコーナーR 部分を 600 倍に拡大し、顕微鏡で撮影したものである。図.2-53 から印加電圧 50、60、70、80V と加工後のワークコーナーR になっており、パルス幅 8μsec の条件で印加電圧 50、60、70、80V と電圧を変化させても加工後のコーナーR 部分にクラックが入らず加工できることが上の写真より判断できる。しかし、コーナーR 部分の表面粗さは印加電圧を高くするにつれ荒くなっているように写真から判断できる。またパルス幅 8μsec の条件で 1mm 加工した電極断面写真を見ると、印加電圧を 50V から 80V まで変化させてもコーナー部分にクラックが入らず加工できることが分かる。以上の結果よりパルス幅 8μsec の条件ではコーナー部分にクラックが入らず加工できることが分かる。

・ パルス幅 32μsec で加工後の電極コーナーR 写真

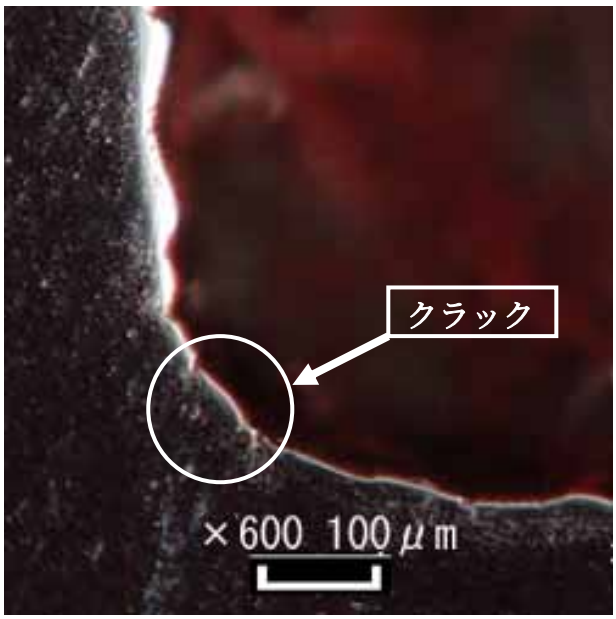


図.2-57　パルス幅 32μsec 印加電圧 50V

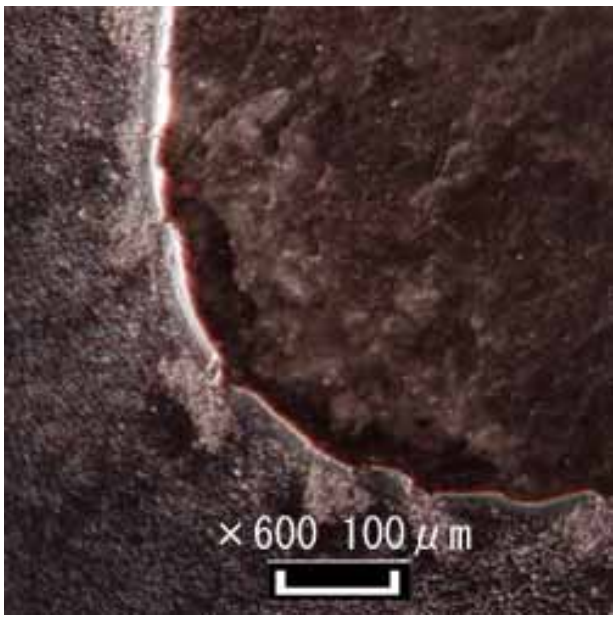


図.2-58　パルス幅 32μsec 印加電圧 60V

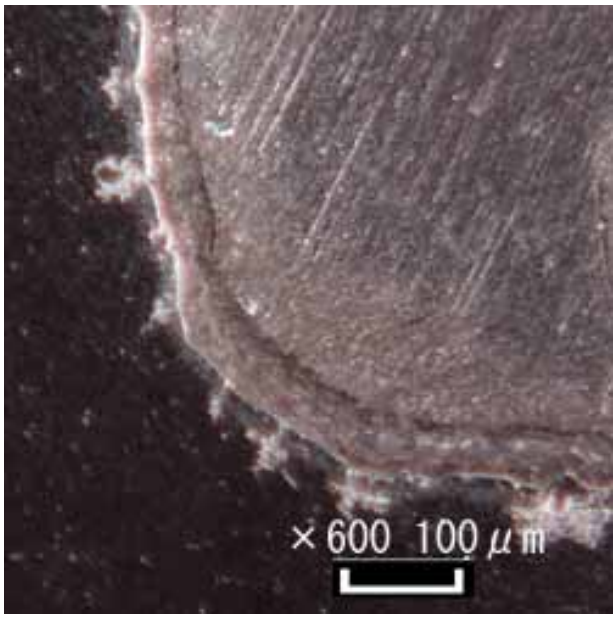


図.2-59　パルス幅 32μsec 印加電圧 70V

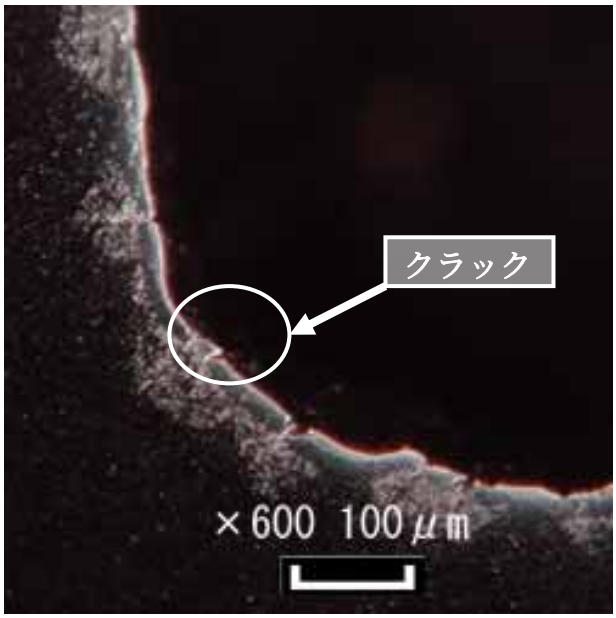


図.2-60　パルス幅 32μsec 印加電圧 80V

・顕微鏡写真からの考察

図.2-57 から図.2-60 の写真は、パルス幅 32μsec と少し長い条件で 1mm 加工後のワークのコーナーR 部分を顕微鏡写真で撮影したものである。図.2-57 から印加電圧 50、60、70、80V と加工後のワークコーナーR になっており、パルス幅 32μsec の条件では印加電圧 50V と電圧が低い条件ではコーナー部分にクラックが入らず加工できるが、印加電圧が 60V になるとコーナーR 部分に微小なクラックが入り、70、80V と電圧を高くなるにつれてコーナー部分のクラックが深くまで入り、印加電圧 80V ではおよそ 100μm 近くクラックが入っていることが写真より判断できる。その結果、パルス幅 32μsec で電圧が 50V の条件はコーナーR 部分にクラックが発生していないが、電圧を 60V から高くしていくとコーナー部分にクラックが発生するためパルス幅 64μsec とパルス幅の長い条件では印加電圧 50V 以上では加工が困難であるということが写真より判断できる。

・パルス幅 8μsec で加工後のワーク表面写真

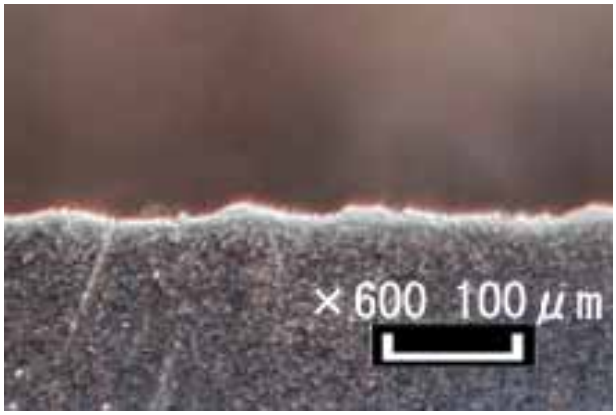


図.2-61　パルス幅 8μsec 印加電圧 50V

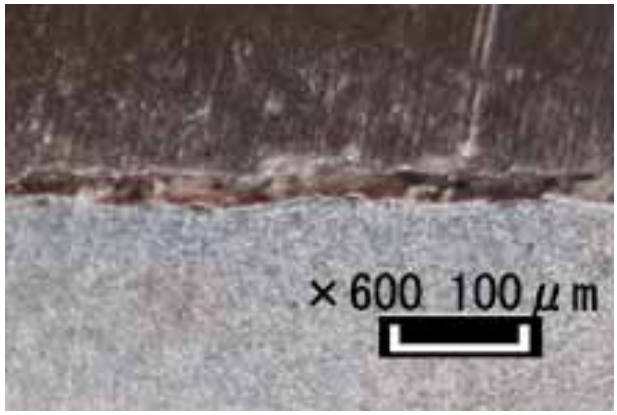


図.2-62　パルス幅 8μsec 印加電圧 60V

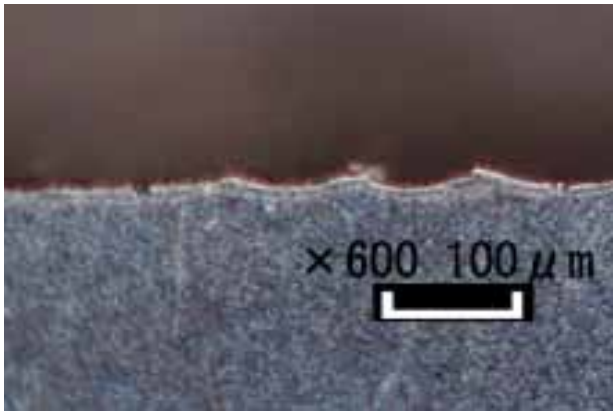


図.2-63　パルス幅 8μsec 印加電圧 70V

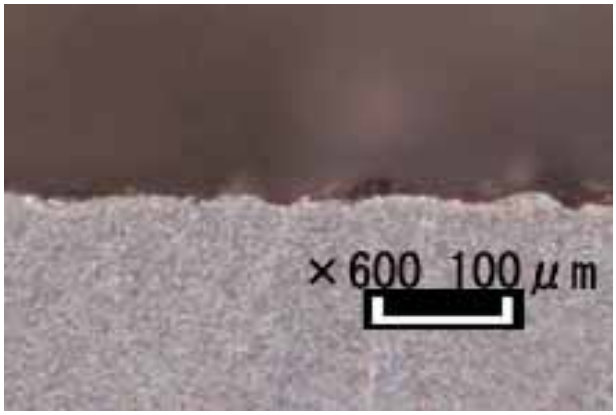


図.2-64　パルス幅 8μsec 印加電圧 80V

・顕微鏡写真からの考察

図.2-61 から図.2-64 の写真は、パルス幅 8μsec の条件で 1mm 加工後のワーク底面部分をデジタル顕微鏡で 600 倍に拡大し撮影したものである。図.2-61 から印加電圧 50、60、70、80V と加工後のワーク底面写真になっており、パルス幅 8μsec の条件では印加電圧を 50、60、70、80V と電圧を高くしても加工面にクラックが入らず加工できることが上の写真より判断できる。

・パルス幅 32μsec で加工後のワーク表面写真

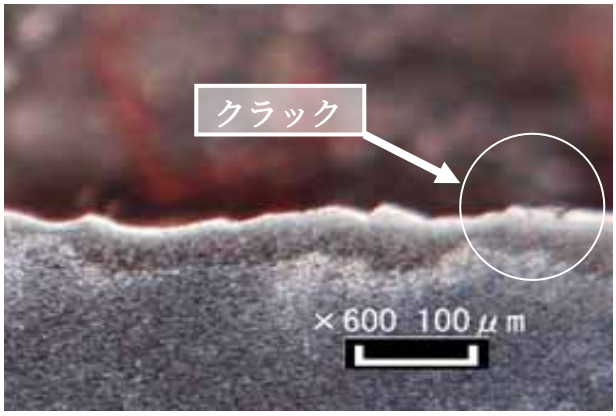


図.2-65　パルス幅 32μsec 印加電圧 50V

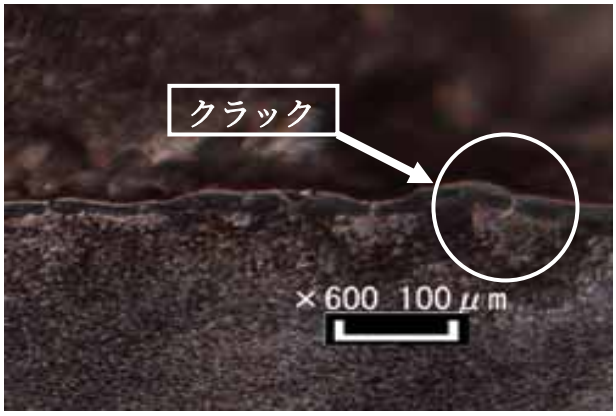


図.2-66　パルス幅 32μsec 印加電圧 60V

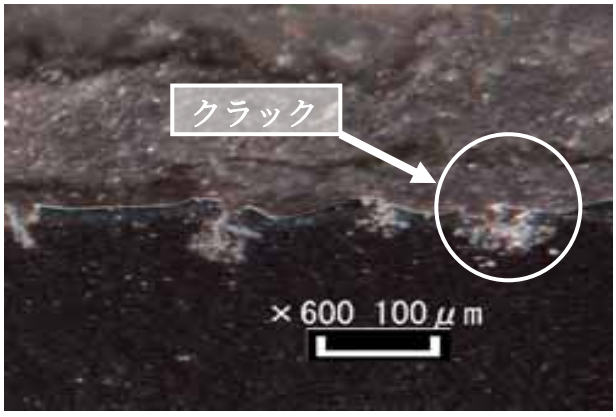


図.2-67　パルス幅 32μsec 印加電圧 70V

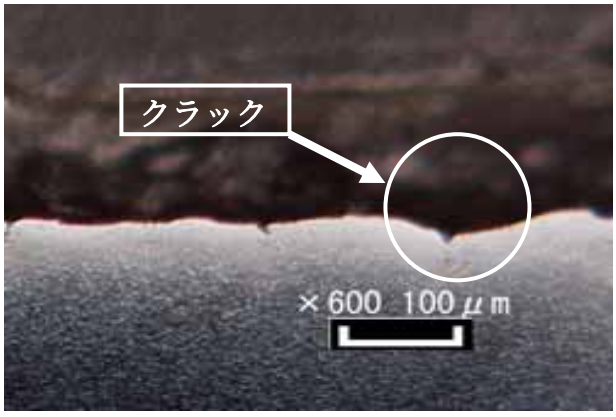


図.2-68　パルス幅 32μsec 印加電圧 80V

・顕微鏡写真からの考察

図.2-65 から図.2-68 の写真は、パルス幅 32μsec と少しパルス幅が長い条件で 1mm 加工後のワーク底面をデジタル顕微鏡で撮影したものである。図.2-65 から印加電圧 50、60、70、80V と加工後のワーク底面写真になっており、パルス幅 32μsec と少しパルス幅を長くした条件では、印加電圧 50V から加工表面にクラックが入っていることが図.2-65 の写真から判断できる。さらに電圧を 60,70,80V と高くしていくにつれクラックの個数が増加していることが図.2-68 の写真より判断できる。以上の結果より、パルス幅 32μsec とパルス幅を長くすると印加電圧 50V から加工面にクラックが入ることから、パルス幅の長い条件での加工は困難であることが。

・クラックの発生メカニズムについて

放電加工は、アーク放電による熱作用を利用し加工をおこなうため、工作物の加工表面は急熱と急冷を繰り返しながら加工が進行する。その放電により熱せられた部分は加工液により急激に冷却されると収縮をはじめる。しかし、材料の内部は溶融状態にあるので表面ほど収縮がおこらない。このように材料内部は溶融状態にあるので収縮されにくいが、表面は急激に冷却され収縮を始めるため加工表面に残留応力として引張り応力が生じる。これらの引張り応力が材料の引っ張り強度を越せば表面にクラックが発生すると考えられる。超硬合金のように高温強度が高い材料を放電加工すると、冷却時に引張り応力に対して材料が変形にくいので、応力を分散することができない。また、放電加工はパルス幅により放電時間を設定することができるためパルス幅が長くなると加工エネルギーが大きくなると考えられる。今回の研究ではパルス幅を 8μsec とパルスの少し長い 64μsec の二つの条件で加工をおこなった。このようにパルス幅が 8μsec とパルスの短い条件では材料表面と材料内部の温度差が少ないため図.2-53～図.2-56 に示したコーナー部分や図.2-61～図.2-64 のワーク底面にクラックが発生しないが、パルス幅を少し長くした 64μsec の条件では、加工エネルギーが大きく材料表面と材料内部の温度差が大きいとため、図.2-57～図.2-60 に示したコーナー部分や図.2-65～図.2-68 のワーク底面にクラックが発生すると考えられる。

以上の結果より、超硬合金のような高温強度が高い材料を放電加工するにはパルス幅を短くした条件で加工すると残留応力が少なくクラックの少ない加工が可能になると考えられる。

・パルス幅 8μsec の条件で、加工中の電流、電圧波形グラフ

図.2-69 から図.2-76 に示すグラフは、パルス幅 8μsec の条件で印加電圧を 50,60,70,80V と変化させた時に測定した加工中の電流、電圧波形を示したグラフである。

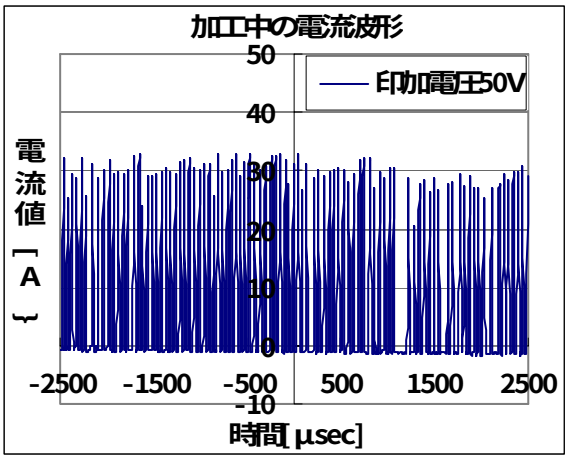


図.2-69 印加電圧 50V　加工中の電流波形

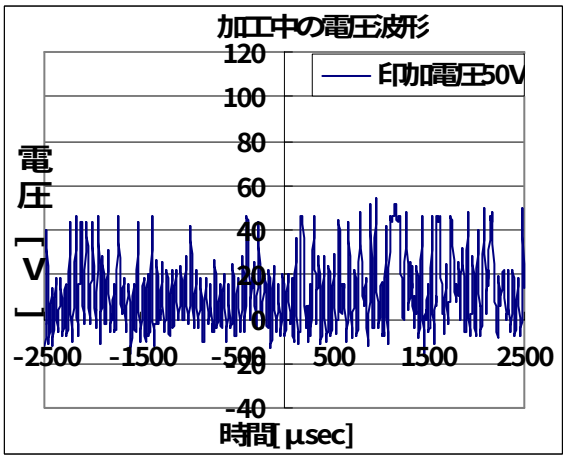


図.2-70 印加電圧 50V　加工中の電圧波形

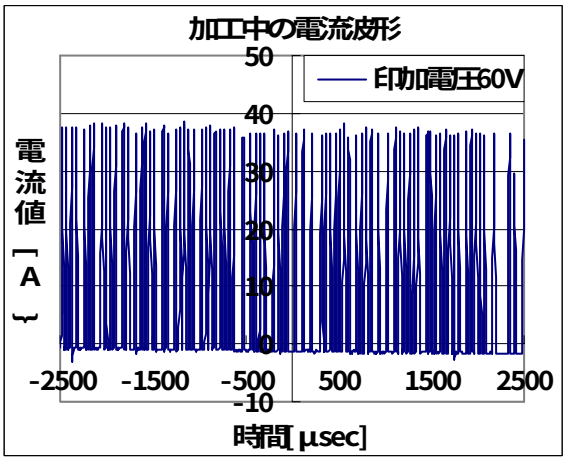


図.2-71 印加電圧 60V　加工中の電流波形

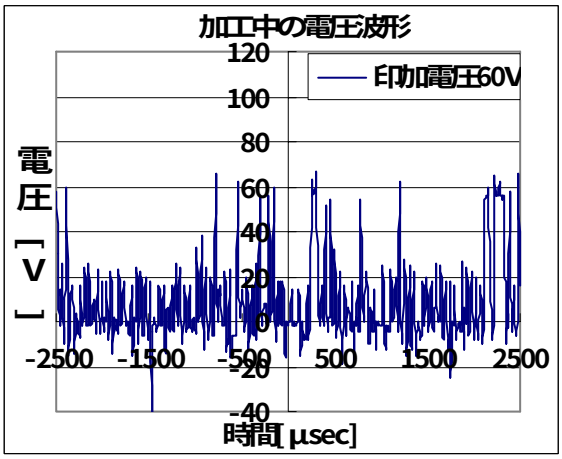


図.2-72 印加電圧 60V　加工中の電圧波形

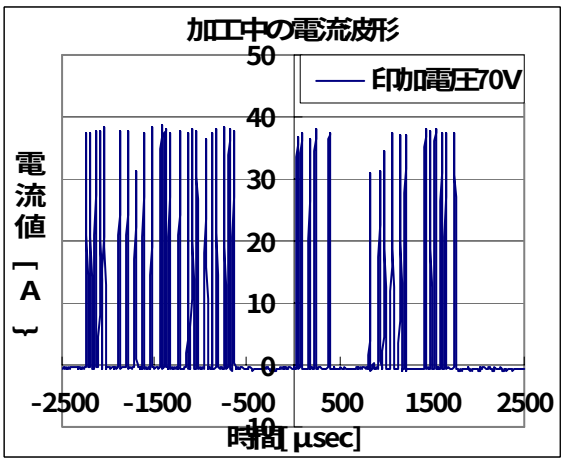


図.2-73 印加電圧 70V　加工中の電流波形

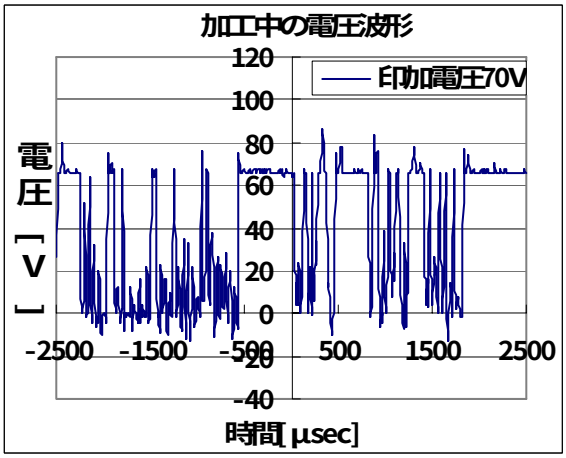


図.2-74 印加電圧 70V　加工中の電圧波形

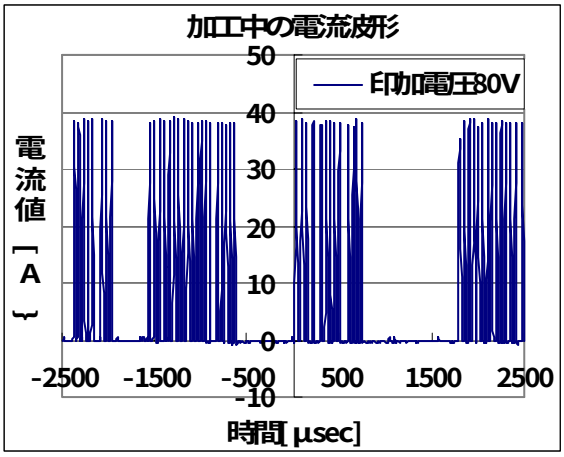


図.2-75 印加電圧 80V　加工中の電流波形

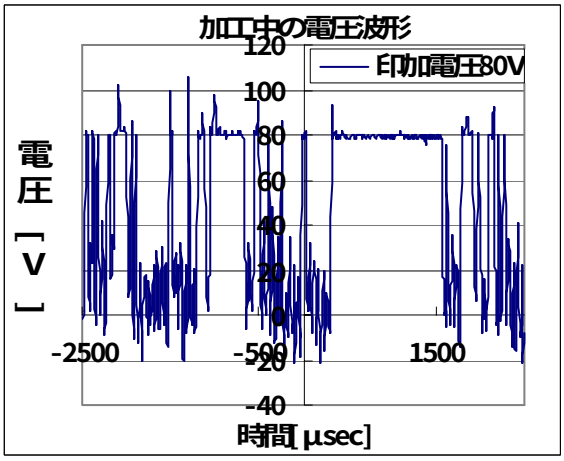


図.2-76 印加電圧 80V　加工中の電圧波形

・ パルス幅 8μsec の条件で加工中の電流、電圧波形においての考察

図.2-69 から図.2-76 はパルス幅 8μsec の条件で加工中の電流、電圧波形を示したグラフである。このグラフは横軸に時間[μsec]、電流波形グラフでは縦軸に電流値[A]とし、電圧波形グラフでは縦軸に電圧[V]としてグラフ化している。パルス幅 8μsec で、印加電圧 50、60V と電圧が低い条件では、電極とワーク間の放電ギャップが狭くなるため、極間に加工屑(以後、スラッジ)がたまりやすい。極間にスラッジがたまると、極間に電圧[V]を加えても、絶縁回復していないので図.2-70 に示す電圧波形のように Td(無付加電圧印加時間)が存在せず、図.2-69 の電流波形のように電流だけが極間に流れる。この無付加電圧印加時間(Td)がなく電流だけが流れると放電が局部的に集中してこのような波形になる。この現象を(以後、集中放電)と呼ぶ。このように印加電圧 50V、60V のように電圧が低くパルス幅の短い場合に発生しやすく加工が不安定になる回数が多くなるため、電極とワーク間のスラッジをいかに排出させるかが重要になってくる。

しかし印加電圧を 70,80V と電圧を高くすると、電極とワーク間の放電ギャップが広くなるため図.76、77 の電圧波形のように無付加電圧印加時間が存在する波形になる。このように電圧を高くすると極間距離が広くなるためスラッジ排出効率が上がり、絶縁回復されやすくなるので、無付加電圧印加時間が存在する安定した波形となる。

以上の結果をふまえ図.2-69～図.1-77 の電流、電圧波形を見ると、電圧が低い 50V の条件では放電ギャップが狭く、絶縁回復しにくいので図.2-69 の電流波形のように電流ピーク値が 30A 程度と電流ピーク値が小さくなる。しかし印加電圧を 60,70,80V と電圧が高くすると無付加電圧印加時間が存在するため、電流ピーク値が 38A 程度と電流が規定電流値(35A)まで立ち上がり加工が安定していることがグラフより分かる。

・ パルス幅 32μsec の条件で、加工中の電流、電圧波形グラフ

図.2-77 から図.2-84 に示すグラフは、パルス幅 32μsec の条件で印加電圧を 50,60,70,80V と変化させた時の加工中の電流、電圧波形を示したグラフである。

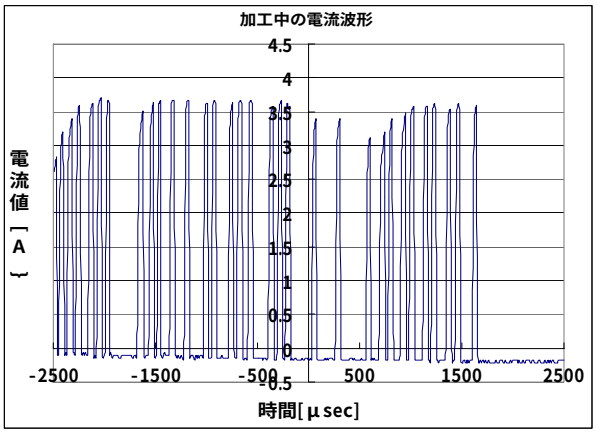


図.2-77 印加電圧 50V　加工中の電流波形

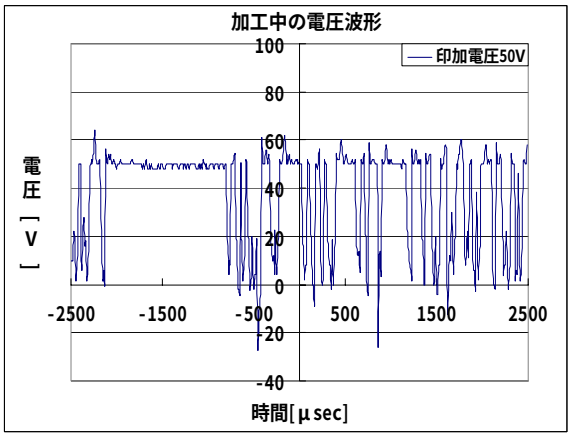


図.2-78 印加電圧 50V　加工中の電圧波形

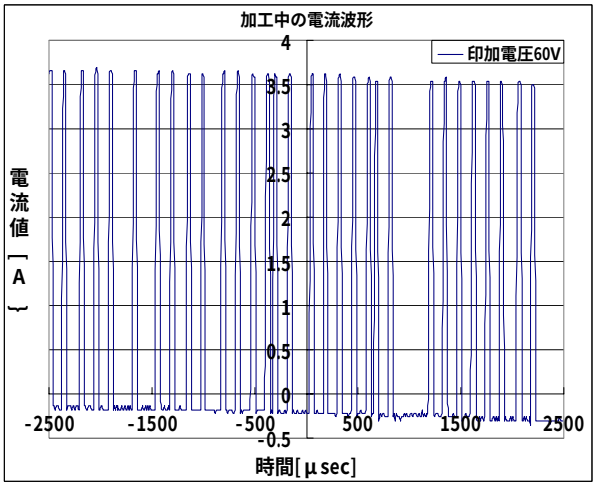


図.2-79 印加電圧 60V　加工中の電流波形

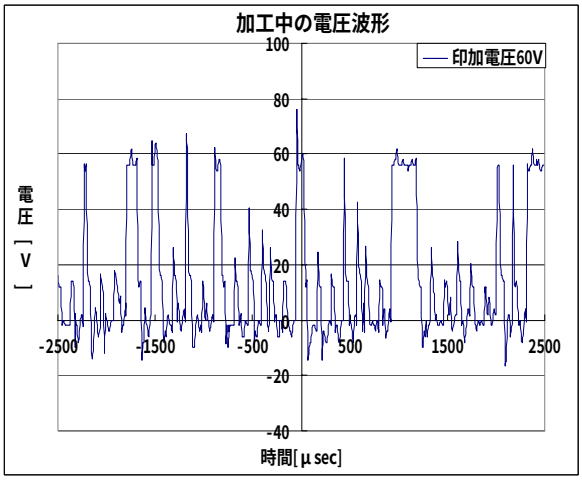


図.2-80 印加電圧 60V　加工中の電圧波形

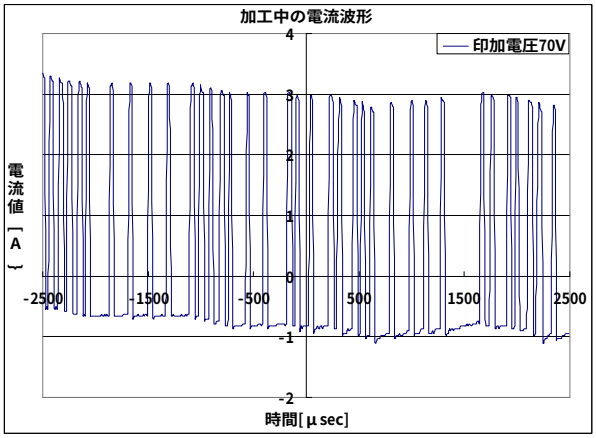


図.2-81 印加電圧 70V　加工中の電流波形

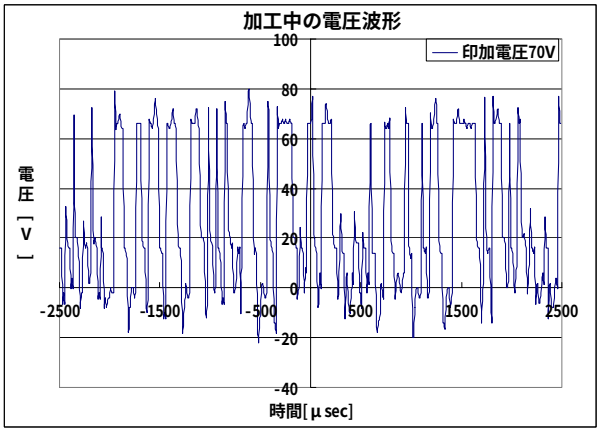


図.2-82 印加電圧 70V　加工中の電圧波形

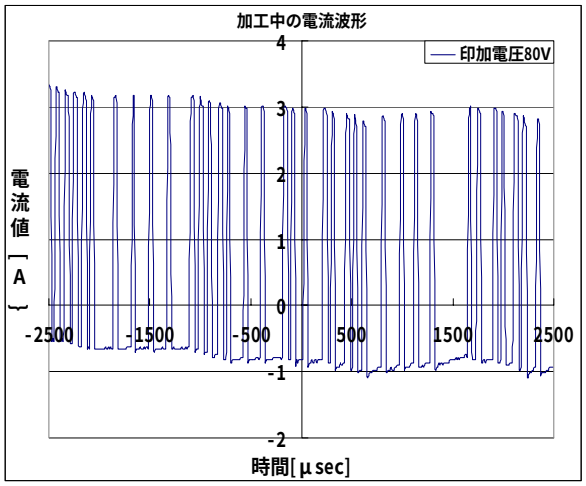


図.2-83 印加電圧 70V　加工中の電流波形

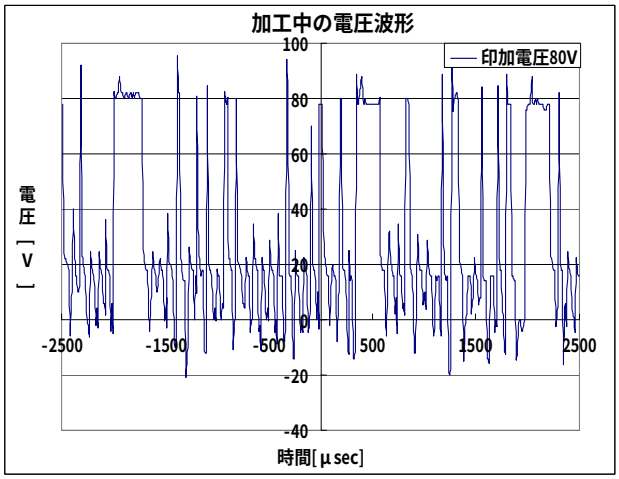


図.2-84 印加電圧 70V　加工中の電圧波形

・ パルス幅 32μsec の条件で加工中の電流、電圧波形においての考察

図.2-77 から図.2-84 はパルス幅を少し長くした条件 32 μsec での加工中の電流、電圧波形を示したグラフである。このグラフは横軸に時間[μsec]、電流波形のグラフでは縦軸に電流値[A]、電圧波形のグラフでは縦軸に電圧[V]となっている。パルス幅 32μsec の条件では、印加電圧 50V のグラフ(図.2-78)を見ると電流波形の一発目の立ち上りが遅く、二発目、三発目と放電回数が増えるにつれて徐々に電流が立ち上がっていくことが上のグラフより判断できる。これは図.2-86 の電圧波形に示している Td(無付加電圧印加時間)の値が長い場合に発生しやすく、図.2-85 ように電流値の立ち上がりが遅れると考えられる。この現象は、今回使っている形彫放電加工機(三菱電機株式会社製 VX10)の機械内部にある電源回路がリアクトル制御を用いているためるためこのように Td(無付加電圧印加時間)が長いと電流波形が立ち上がりにくくなると考えられる。以後この電流波形と機械内部の電源回路についての解析をおこなっていく。しかし印加電圧を 60、70、80V と電圧を高くするにつれ、電極とワークの放電ギャップが広がるため、電流、電圧波形を見ても加工が安定していることが上のグラフより判断できる。

パルス幅 32μsec と少しパルスが長い条件では、印加電圧を 80V から 50V まで電圧を変化させて無負荷電圧印加時間が存在する波形になっていることが分かる。このようにパルス幅を長くすると電圧を変化させても電流ピーク値がほとんど変化しないことが分かる。

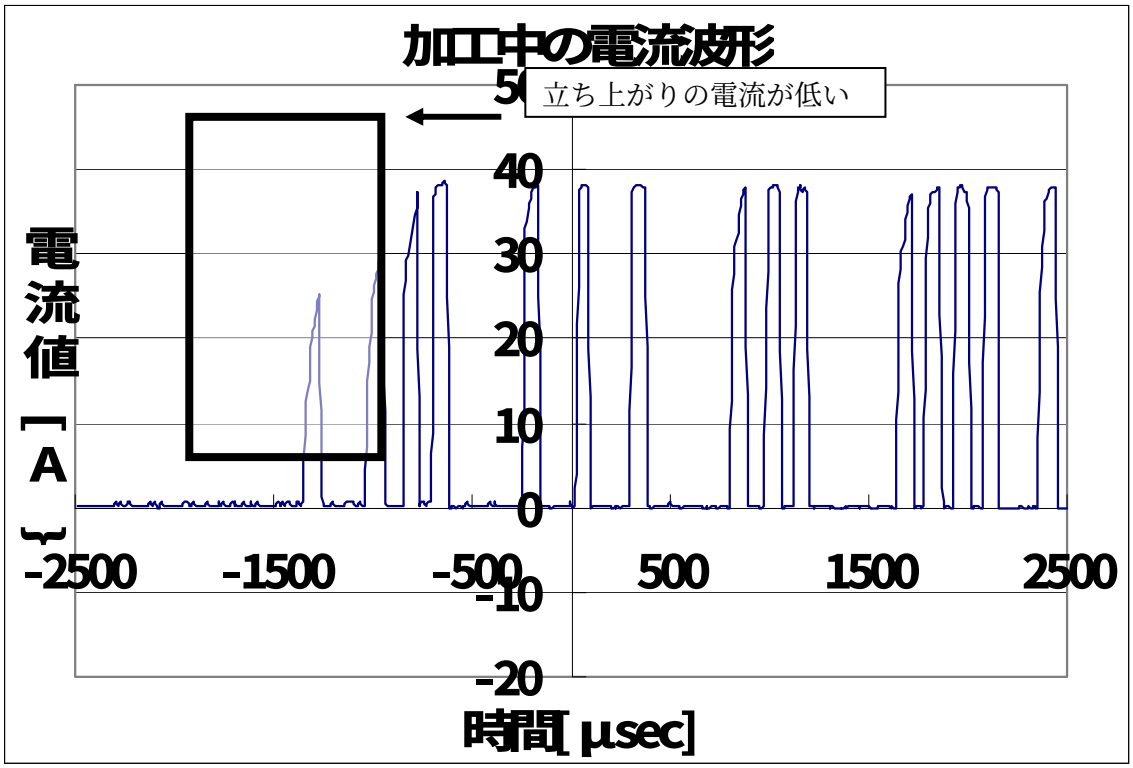


図.2-85　加工中の電流波形グラフ

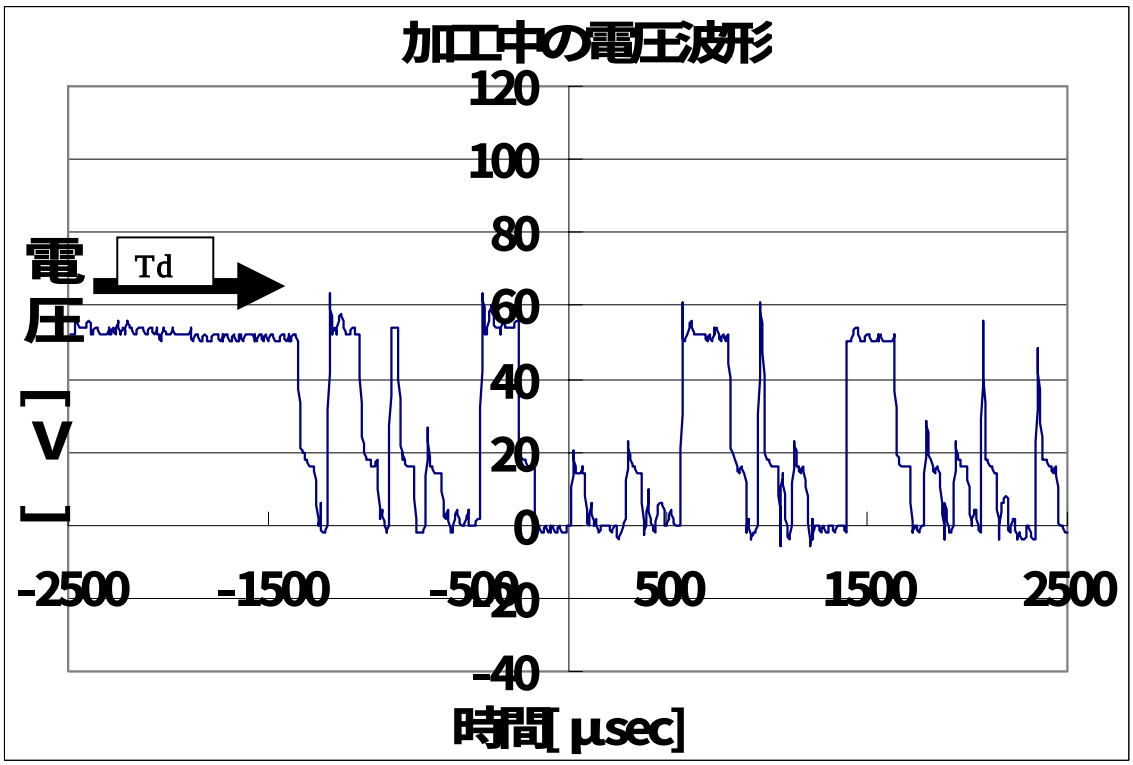


図.2-86　加工中の電圧波形グラフ

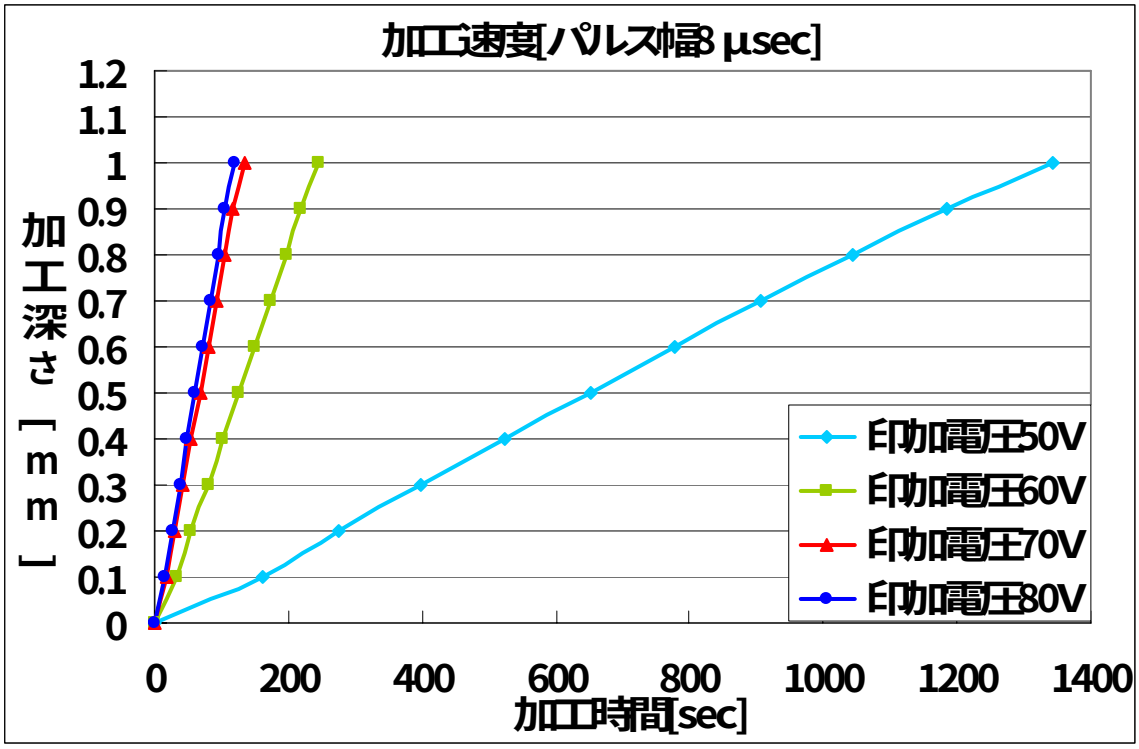


図.2-87　1mm 加工する場合の加工速度(パルス幅 8μsec)

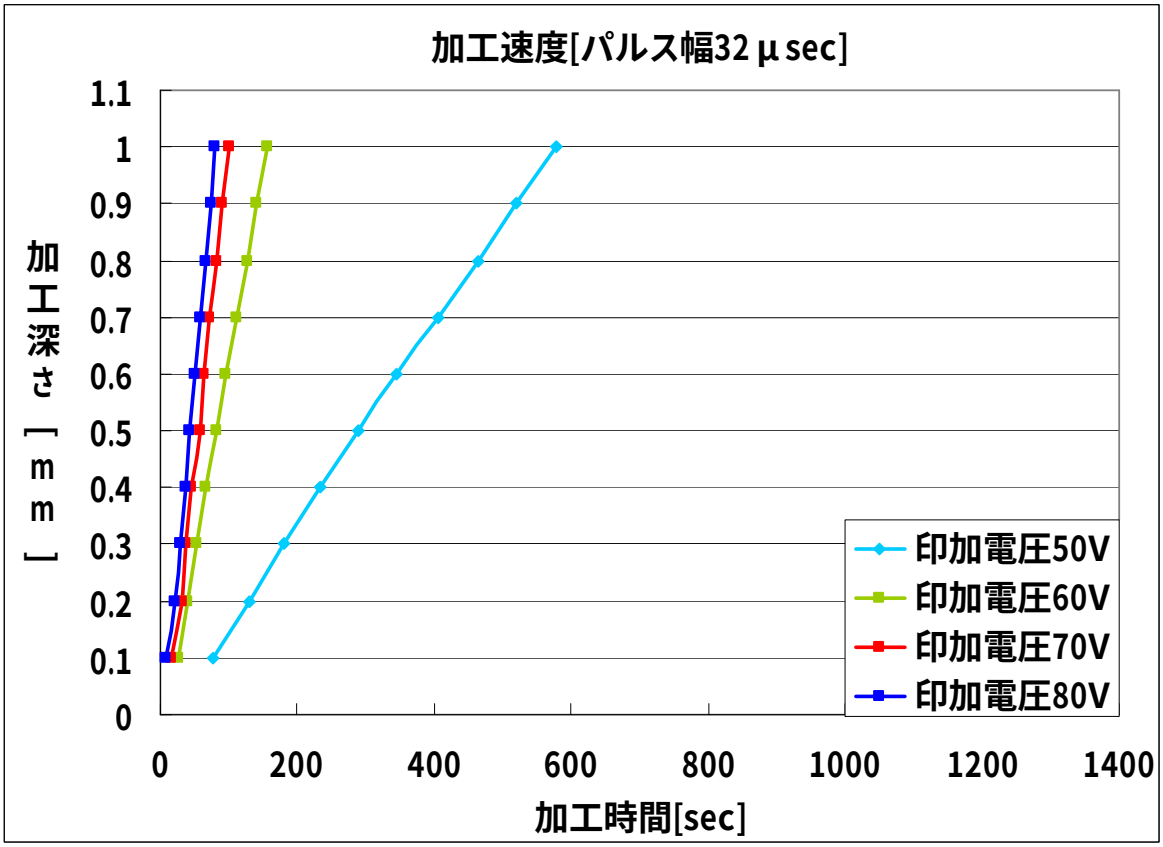


図.2-88　1mm 加工する場合の加工速度(パルス幅 32μsec)

・印加電圧を変化させて加工後の加工速度の考察

図.2-87 はパルス幅 8μsec、図.2-88 はパルス幅 32μsec の条件で 1mm 加工する場合の加工速度を印加電圧ごとに示したグラフである。このグラフは、横軸に加工時間[sec]縦軸に加工深さ[mm]としグラフ化したものである。パルス幅 8μsec の加工速度は、印加電圧 80,70V と電圧が高い条件では加工速度にさほど変化は見られないが、電圧を 60V にすると少し加工速度が遅くなり、さらに電圧を 50V まで下げると急激に加工速度が低下していることが上の図.89 のグラフより判断できる。

図.2-88 のパルス幅 32μsec でも、印加電圧 80,70,60V と電圧を下げるにつれ少しずつ加工速度は低下するが印加電圧 60V から 50V まで 10V 電圧を下げると加工速度が急激に遅くなっていることが図.2-88 のグラフより判断できる。

パルス幅 8μsec、32μsec の二つの条件に共通していえることは、印加電圧を 60V から 50V へと電圧を下げると急激に加工速度が低下するということが図.2-87、図.2-88 のグラフより判断できる。このように印加電圧 80、70、60V と電圧を下げるにつれ加工速度は均等に遅くなるのに対し、60V から 50V に電圧を下げると急激に加工速度が低下することから 60V と 50V の間には電圧の他に機械的な要因があるのではないかと考えた。そこで第 2 章で、この印加電圧を下げるにつれ加工速度が低下する要因について考えることにした。

# 第 3 章　放電加工機の電源回路解析

## 1.形彫放電加工機の電源回路について

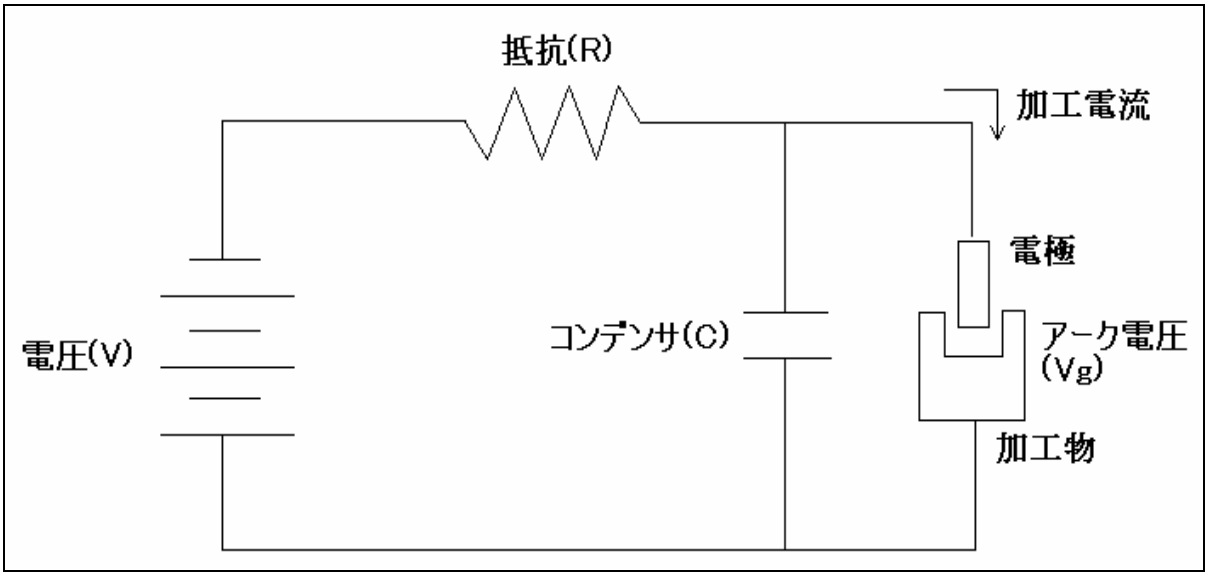


図.3-1　コンデンサ放電回路(従来の電源回路)

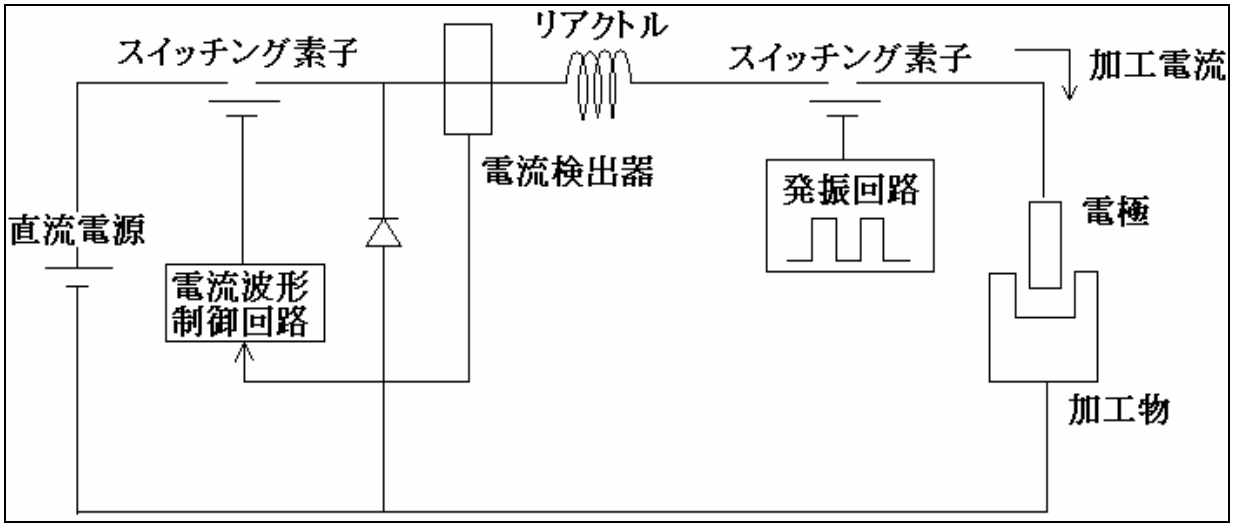


図.3-2　リアクトルスイッチング方式の基本回路

・放電加工機の電源回路について

従来の放電加工機は、図.3-1 に示したコンデンサ放電回路が放電加工機の支流であった。このコンデンサ回路を使用し、電極に銅(極性＋)、工作物に鋼(極性－)の加工をおこなう場合、銅対鋼の加工では図.3-1 のアーク電圧(Vg)はおよそ 20～25(V)であるので、80V の電圧で銅対鋼を加工する場合アーク電圧が 20(V)でその他の 60(V)は抵抗で電圧が消耗するという非常にエネルギー効率の悪い回路であった。最近ではこのコンデンサ放電回路に変わって図.3-2 に示すような、リアクトルスイッチング方式回路を使用するようになった。このリアクトルスイッチング方式回路は、従来抵抗が使われていた部分にリアクトルというコイル状の抵抗を使用することにより、加工中の急激な電流の立ち上がりや立ち下がり抑える役割を持っている。

これらを利用することで回路を流れる電流を一定に制御することができるため従来のコンデンサ放電加工機のように電圧のエネルギーロスの少ない回路が実現でき、現在形彫放電加工機の大半の回路に使用されるようになった。今回研究に使用した放電加工機は、このリアクトルスイッチング回路を用いて電流値を制御する回路を内装した三菱電機株式会社製の形彫放電加工機(VX10)を使用した。図.3-2 に示した電流検出器が加工中にリアクトルを流れる電流を検出して、リアクトルに流れる電流が指令電流値(以後、電流ピーク値)に達するようにスイッチング素子を On、Off しながら一定の電流ピーク値又は電流波形になるように制御する制御方式のことを、リアクトル制御方式と呼んでいる。この図.3-2 の図は、リアクトルスイッチング方式回路の基本回路であるため、次の図.3-6 にリアクトルスイッチング方式回路を示す。また図.3-7 にはリアクトルスイッチング回路を流れるリアクトル電流のスイッチングタイミング及び、トランジスタのスイッチングタイミングを示している。

・加工中の電流、電圧波形について

図.3-3 、図.3-4 のグラフは、加工中にデジタルオシロスコープで電流電圧波形を測定したデータをエクセルでグラフ化したものである。本研究は印加電圧を 80、70、60、50V と電圧を下げながら加工をおこなった。印加電圧を下げていくと図.3-3 ように Td(無付加電圧印加時間)が長くなる回数が多くなり、Td が長いと図.3-4 ように電流の 1 発目の立ち上がりが遅れる現象が頻繁に現れた。このように Td が長くなると、図.3-5 ように印加電圧を 80、70V ではさほど速度に変化は見られないが 60V まで下げると少し加工速度が遅くなり、さらに 60 から 50V に電圧を下げると極端に加工速度が低下する結果となった。このように Td の時間が長くなると加工速度を低下させる原因になってしまう。印加電圧を下げていくと Td の時間が長くなり電流ピーク値も低下する原因として、図.3-2 に示した回路内にあるリアクトルスイッチング回路に問題があるのではないかと考えた。そこでこの章では、放電加工機の電源回路について解析をおこなっていく。

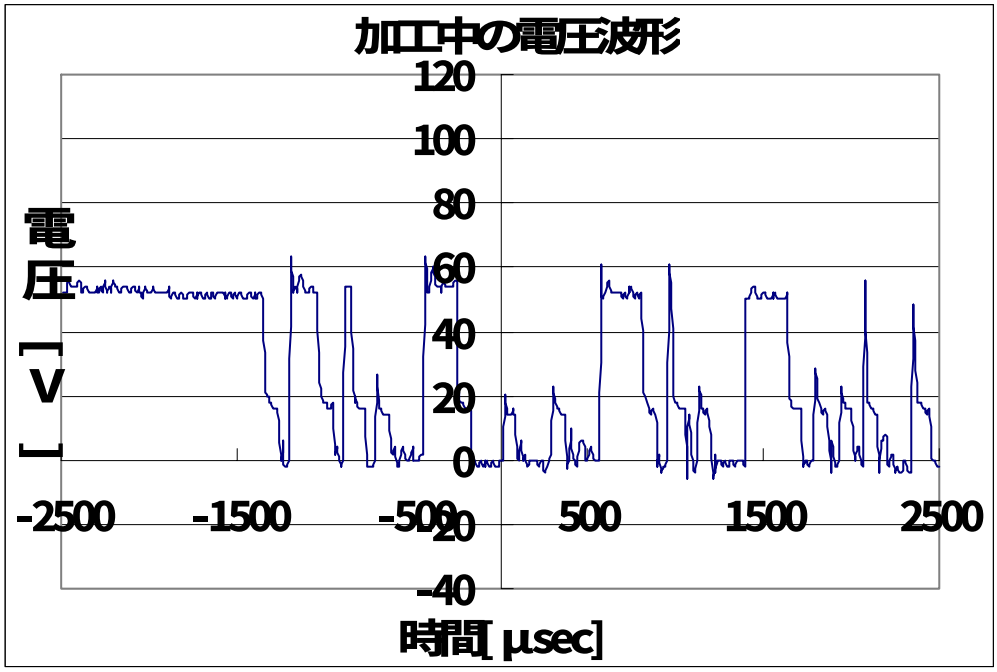


図.3-4 加工中の電圧波形グラフ

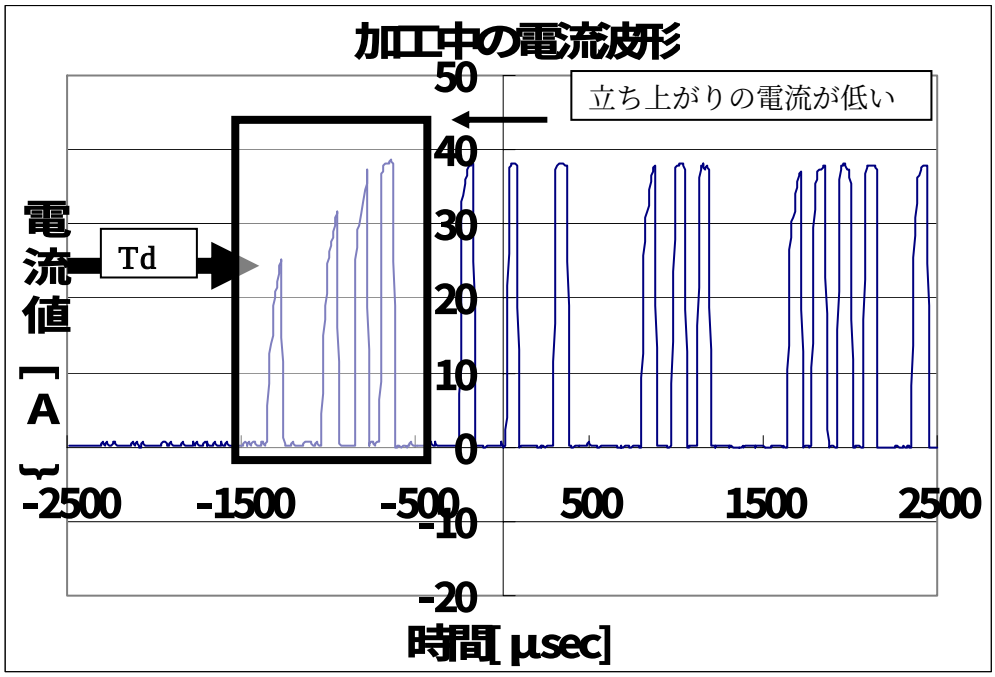


図.3-5 加工中の電流波形グラフ

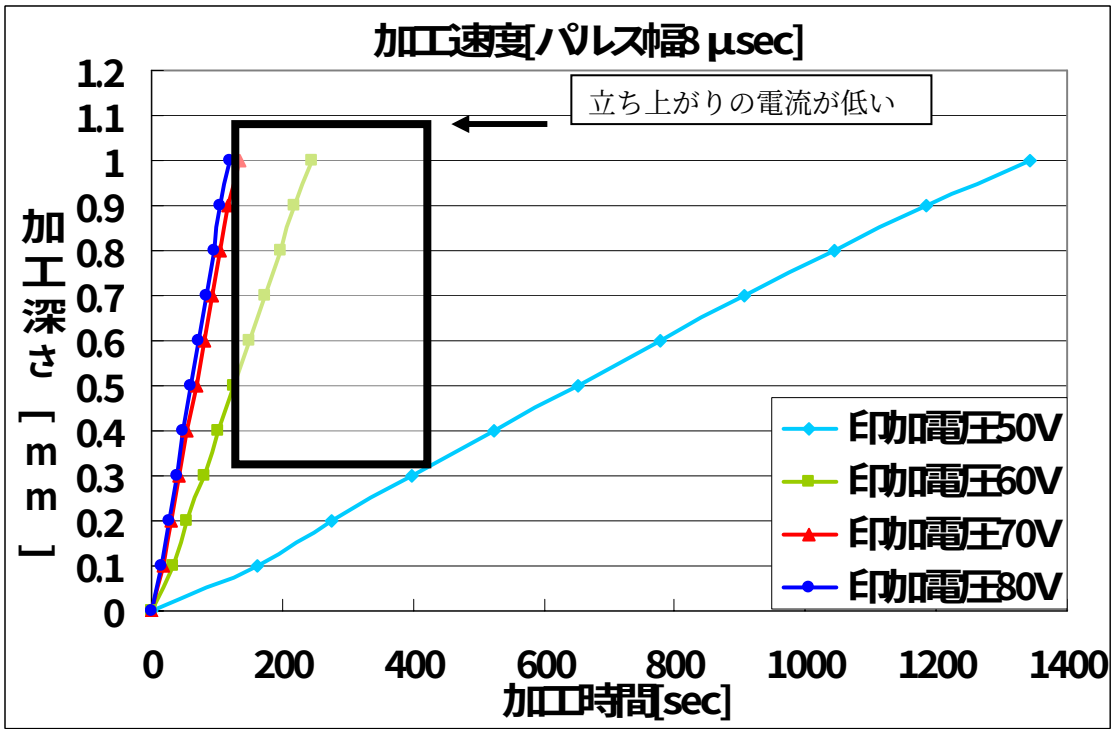


図.3-3 印加電圧を変化させ 1mm 加工する加工速度

・リアクトルスイッチング回路とスイッチンタイミングについて

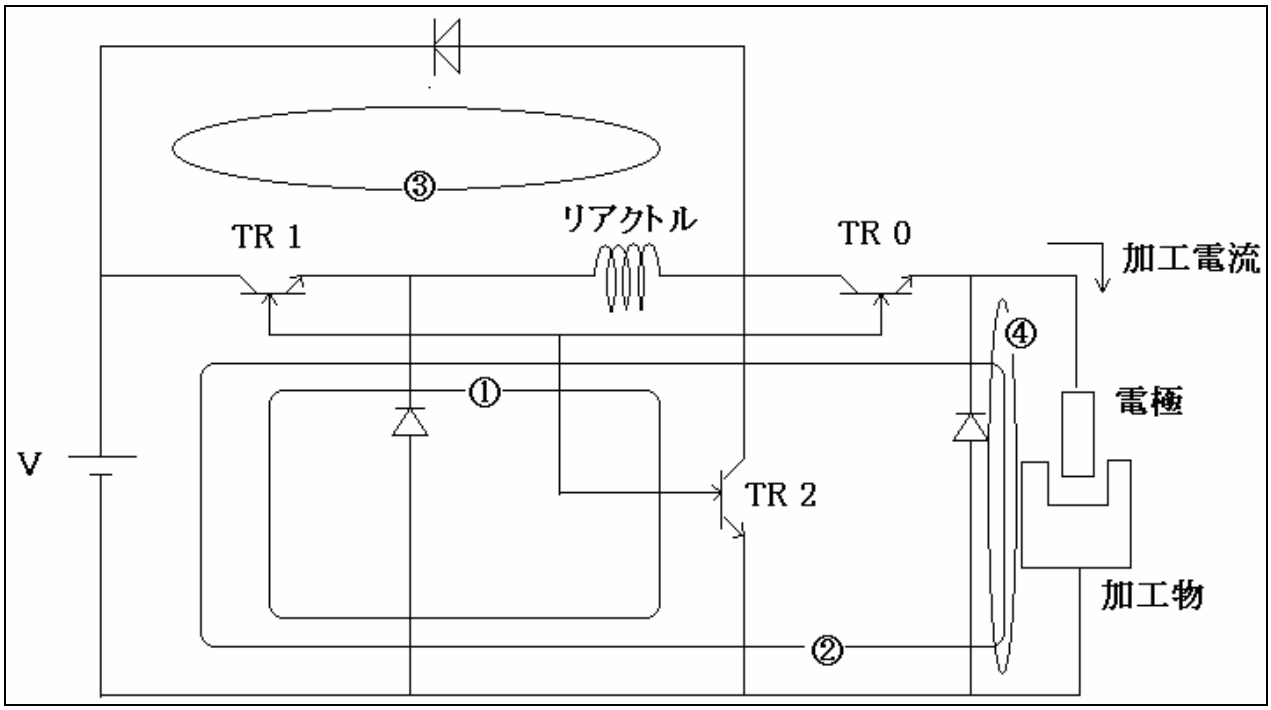


図.3-6　リアクトルスイッチング回路の基本図

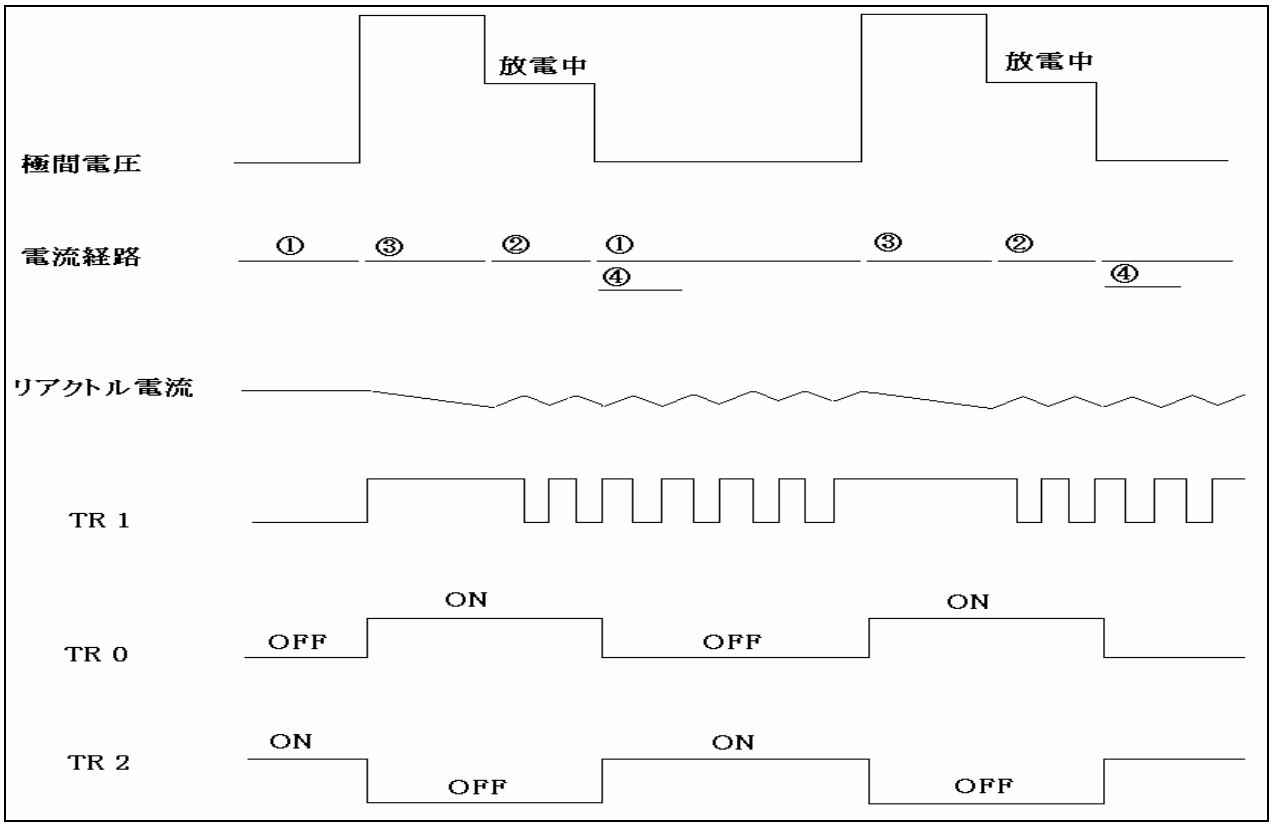


図.3-7　回路を流れるリアクトル電流のスイッチングタイミング

図.3-6 はリアクトルスイッチング回路の基本図を示した図である。図.3-7 は図.3-6 のリアクトルスイッチング回路のスイッチタイミングとトランジスタタイミングを示した図となっている。図.3-7 は上から極間電圧波形のタイミングを示しており、次に図.3-6 を流れる電流経路を示し、その下にリアクトルを流れる電流タイミング、トランジスタ(以後、TR)1、TR0、TR3 のスイッチタイミングを示した図である。上のスイッチタイミングを詳しく説明すると、極間電圧の Td(無付加電圧印加時間)の時、リアクトルスイッチング回路の③を通るように TR1、TR0 が On になり、TR2 が Off になる。しかし放電はしないので、リアクトルにたまった電流は③を回り電流を蓄えて待つ。③を回ると回路内にダイオードとトランジスタがある。ダイオードは両端に 0.5V の電圧がかかり、トランジスタを通ると 0.5(V)の電圧を消費するので③を回るたびに 1V の電圧が消費することになる。③を回ると電圧を消費するのでリアクトル電流は上限から下限にかけて減少する。放電中は電流経路②を通るので TR0 が On になり、TR1 はリアクトル電流が上限に達すると Off、下限に近くなると TR1 が On になる。休止時間の場合は、放電した電流がダイオードに流れた分が④を回りダイオードと極間で放電しながら電圧を消費する。その他の電流は①を回るため TR0 が Off になるので TR0 には電流が流れず、TR2 に電流が流れる。TR1 はリアクトル電流を制御するため、リアクトル電流が上限にくると Off、下限になると On を繰り返しながる Td(無付加電圧休止時間)がくるまで On、Off を繰り返しながら電流を制御する。この一連の動作をリアクトルスイッチング方式の基本動作とする。

・加工中にリアクトル電流が流れる回路について

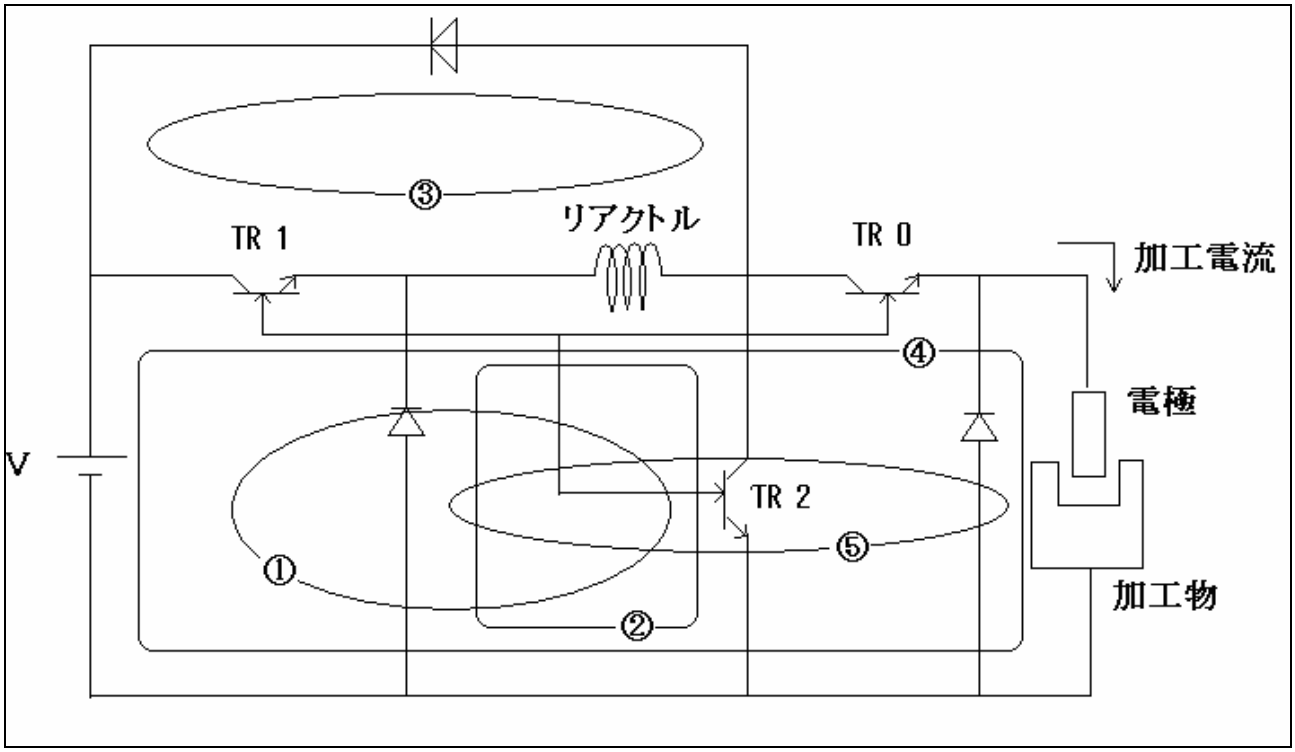


図.3-8　リアクトル電流が流れる回路

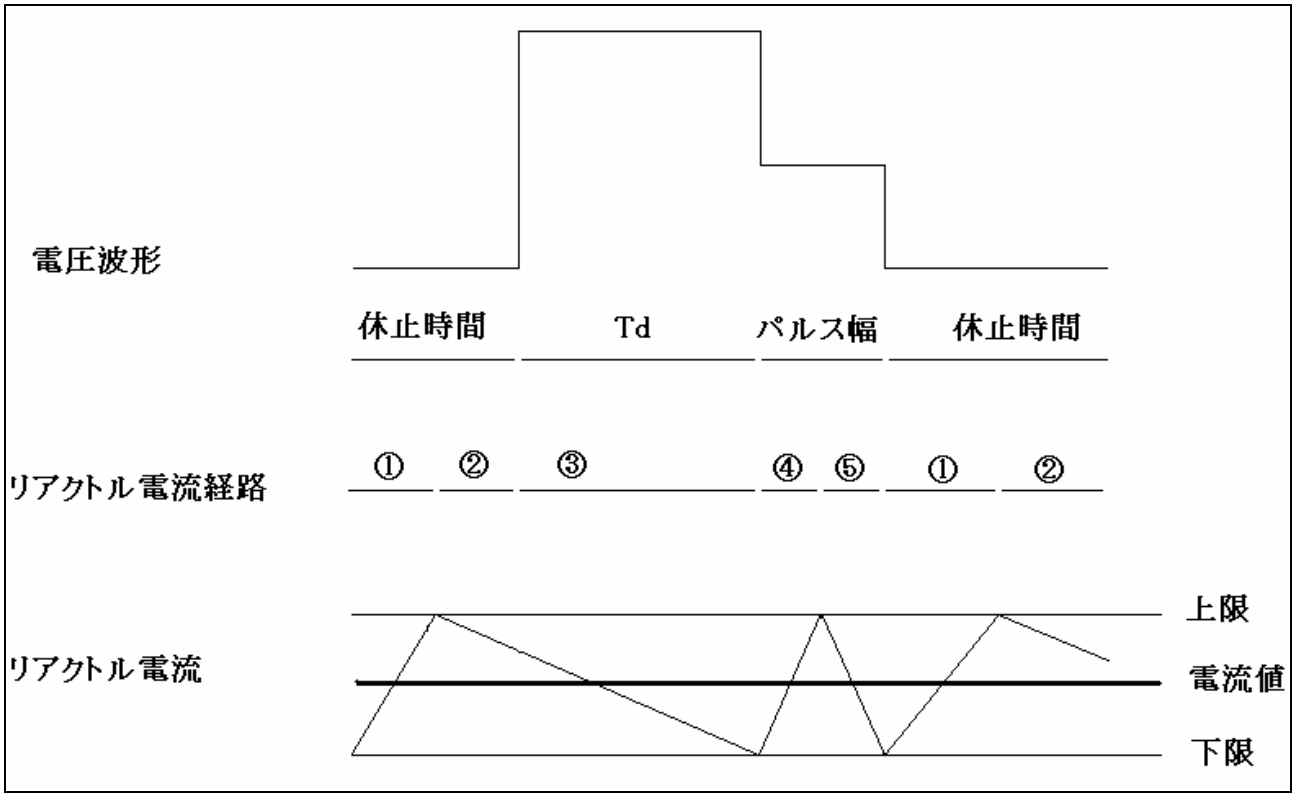


図.3-9　電圧波形とリアクトル電流の関係図

## 2.リアクトル電流が流れる回路について

図.3-8 の①から⑤の番号は、図.3-9 に示す電圧波形 1 パルス中にリアクトル電流が流れる回路について示したものである。この①から⑤を流れるリアクトル電流の方程式を以下に示す。またこの方程式にはコンデンサとダイオードの抵抗は全体の印加電圧から考えればたいした値にはならないので考えないものとした。

①を流れる電流　(休止時間中のリアクトル電流の立ち上がり)

$$L\frac{di}{dt} = V$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V}{L}$$

$$i = \int \frac{V}{L}\,dt$$

$$= \frac{V}{L}t + C \quad \cdots\cdots\cdots\

④を流れる電流　(パルス幅(放電中)のリアクトル電流の立ち上がり)

$$L\frac{di}{dt} = (V - Vg)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{(V - Vg)}{L}$$

$$i = \int \frac{(V - Vg)}{L} dt$$

$$= \frac{(V - Vg)}{L} t + C \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

⑤を流れる電流　(パルス幅(放電中)のリアクトル電流の立ち下がり)

$$L = \frac{di}{dt} - eg = 0$$

$$i = -\int \frac{eg}{L} dt$$

$$= -\frac{eg}{L} t + c \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

本研究では、印加電圧を 50、60、70、80V と変化させ電流値は 35A、休止時間 32(μsec)、パルス幅 8(μsec)の条件で加工をおこなった。そこで、リアクトル電流の解析にも電圧を 50、60、70、80V の 4 つの条件に変化させ、Td(無付加電圧印加時間)は 2000、1000、20、0μsec と Td が長い時、短い時、ゼロの時と 4 つ変化させ解析をおこなっていく。図.3-8 に示したリアクトル電流の電流値は 35A で、リアクトル電流は上限と下限があるため、上限を 36.75(A)、下限を 33.25(A)と上限、下限を電流値の±5 パーセントとし、解析をおこなっていく。リアクトル電流は休止時間中をスタートし、初期値に下限値 33.25(A)とした。

・ 印加電圧 50V の時のリアクトル電流について

$0 \le t \le 7$ の時

① を流れる電流(休止時間中のリアクトル電流の立ち上がり)

(1)式の t を左辺に移項すると

$$t1 = \frac{(i1 - c1)L}{V} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6)$$

上の(4)式になる。(4)式に i1=36.75(A)、V=50(V)、L=100μH、c1=33.25(A)を代入すると

$$t1 = \frac{(36.75 - 33.25) \times 100}{50}$$

$$= 7(\mu \text{sec})$$

となる。休止時間中のリアクトル電流の立ち上がりは 7(μsec)時間がたつとリアクトル電流は 36.75(A)の上限まで達することになる。

② を流れる電流(休止時間中のリアクトル電流の立ち下がり)

$7 \le t \le 32$ の時

(2)の式より

$$i2 = -\frac{1}{L}t2 + c2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7)$$

$$t2 = (c2 - i2)L \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (8)$$

(2)式の t2 を左辺に移項すると(6)式になる。(6)式に、c2=36.75(A)、i2=33.25(A)、L=100μH を代入すると

$$t2 = (36.75 - 33.25) \times 100$$

$$= 350(\mu \text{sec})$$

となる。休止時間が長いと 350(μsec)たつとリアクトル電流は 33.25(A)までさがるが、休止時間が 32(μsec)と短いので、(5)の式に t2=25μsec、c2=36.75(A)代入すると

$$i2 = -\frac{25}{100} + 36.75$$

$$i2 = 36.5(A)$$

となる。休止時間中のリアクトル電流の立ち下りは 25(μsec)たつと 36.5(A)まで下がる。

③ Td の立ち下り

(3)式より

$$i3 = -\frac{1}{L}Td + c3 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

$32 \le t \le 2032$ の時

(7)式に、L=100(μH)、c3=36.5(A)、Td=2000(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{2000}{100} + 36.5$$

=16.5(A)

$32 \le t \le 1032$ の時

(7)式に、L=100(μH)、c3=36.5(A)、Td=11000(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{1000}{100} + 36.5$$

=26.5(A)

$32 \le t \le 52$ の時

(7)式に、L=100(μH)、c3=36.5(A)、Td=20(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{20}{100} + 36.5$$

=36.25(A)

$32 \le t \le 32$ の時

(7)式に、L=100(μH)、c3=36.5(A)、Td=0(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{1}{100} \times 0 + 36.5$$

=36.5(A)

となる。以上の結果より Td(無付加電圧印加時間)が 0μsec ではリアクトル電流値は下がらないが、Td が 2000(μsec)のように長くなると、リアクトル電流が非常に下がることが分かる。

④ パルス幅(放電中)の立ち上がり

(4)式より

$$i4=\frac{(V-Vg)}{L}t4+c4 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (10)$$

$$t4=\frac{(i4-c4)L}{(V-Vg)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (11)$$

(10)式の t4 を左辺に移項すると(11)になる。

(10)でパルス幅(放電中)のリアクトル電流を求め、(11)の式で、リアクトル電流が上限(36.75A)に達するまでの時間を求めることができる。

## $2032 \leq t \leq 2040$ の時

(11)の式に、V=50(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=16.5(A)を代入し計算すると

$$t4=\frac{(36.75-16.5)\times 100}{(50-20)}$$

=67.5(μsec)

Td が 2000(μsec)の場合、放電の立ち上がりは 67.5(μsec)の時間で上限値の 36.75(A)になることが分かる。しかし、パルス幅は 8(μsec)と短いので、リアクトル電流は上限値まで達しない。そこで(10)式の T4=8(μsec)を代入して計算すると

$$i4=\frac{(50-20)}{100}\times 8+16.5$$

=18.9(A)

パルス幅 8(μsec)で 18.9(A)までしかリアクトル電流は上がらないことになる。

## $1032 \leq t \leq 1040$ の時

(11)の式に、V=50(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=26.5(A)を代入し計算すると

$$t4=\frac{(36.75-26.5)\times 100}{(50-20)}$$

=34.2(μsec)

Td が 1000(μsec)の場合、放電の立ち上がりは 34.2(μsec)の時間で上限値の 36.75(A)になることが分かる。しかし、パルス幅は 8(μsec)と短いので、リアクトル電流は上限値まで達しない。そこで(10)式の T4=8(μsec)を代入して計算すると

$$i4=\frac{(50-20)}{100}\times 8+26.5$$

=28.9(A)

パルス幅 8(μsec)で 28.9(A)までしかリアクトル電流は上がらないことになる。

## $32 \leq t \leq 33.7$ の時

(11)の式に、V=50(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=36.25(A)を代入し計算すると

$$t4 = \frac{(36.75 - 36.25) \times 100}{(50 - 20)}$$

=1.7(μsec)

Td が 20(μsec)と短い場合、放電の立ち上がりは 1.7(μsec)と瞬時に上限値の 36.75(A)に達することになる。

## $32 \leq t \leq 32.83$ の時

(11)の式に、V=50(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=36.5(A)を代入し計算すると

$$t4 = \frac{(36.75 - 36.5) \times 100}{(50 - 20)}$$

=0.83(μsec)

Td が 0(μsec)では、放電の立ち上がりは 0.83(μsec)で上限値の 36.75(A)に達することになる。

⑤ パルス幅(放電中)の立ち下がり

(4)式より

$$i5 = -\frac{Vg}{L}t5 + c5 \quad \cdots\cdots\cdots\

$32.83 \leq t \leq 40$ の時

(12)の式に、Vg=20(V)　L=100μH　i5=36.75(A)、t5=7.17(μsec)を代入し計算すると

$$i5 = -\frac{20}{100} \times 7.17 + 36.75$$

=35.32(A)

パルス幅 8(μsec)で Td が 0(μsec)の時、放電の立ち上がりに 0.83(μsec)時間がかかる。そこで立下りの時間は 7.17(μsec)となる。(12)の式の t5 に代入して計算すると、7.17(μsec)後には、リアクトル電流は 35.32(A)まで下がることができる。

・電圧 60V の時のリアクトル電流について

$0 \le t \le 5.83$ の時

① を流れる電流(休止時間中のリアクトル電流の立ち上がり)

(1)式の t を左辺に移項すると

$$t1 = \frac{(i1 - c1)L}{V} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (13)$$

上の(13)式になる。(13)式に i1=36.75(A)、V=60(V)、L=100μH、c1=33.25(A)を代入すると

$$t1 = \frac{(36.75 - 33.25) \times 100}{60}$$

$$= 5.83(\mu \sec)$$

となる。休止時間中のリアクトル電流の立ち上がりは 5.83(μsec)時間がたつとリアクトル電流は 36.75(A)の上限まで達することになる。

② を流れる電流(休止時間中のリアクトル電流の立ち下がり)

$5.83 \le t \le 32$ の時

(2)の式より

$$i2 = -\frac{1}{L} t2 + c2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (14)$$

$$t2 = (c2 - i2)L \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (15)$$

(14)式の t2 を左辺に移項すると(15)式になる。(15)式に、c2=36.75(A)、i2=33.25(A)、L=100μH を代入すると

$$t2 = (36.75 - 33.25) \times 100$$

$$= 350(\mu \sec)$$

となる。休止時間が長いと 350(μsec)たつとリアクトル電流は 33.25(A)までさがるが、休止時間が 32(μsec)と短いので、(14)の式に t2=25μsec、c2=36.75(A)代入すると

$$i2 = -\frac{1}{100} \times 26.17 + 36.75$$

$$i2 = 36.49(A)$$

となる。休止時間中のリアクトル電流の立ち下りは 36.75(μsec)たつと 36.49(A)まで下がる。

③ Td の立ち下り

(3)式より

$$i3 = -\frac{1}{L}Td + c3 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (16)$$

$32 \leq t \leq 2032$ の時

(16)式に、L=100(μH)、c3=36.49(A)、Td=2000(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{2000}{100} + 36.49$$

=16.49(A)

$32 \leq t \leq 1032$ の時

(16)式に、L=100(μH)、c3=36.49(A)、Td=1000(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{1000}{100} + 36.49$$

=26.49(A)

$32 \leq t \leq 52$ の時

(16)式に、L=100(μH)、c3=36.49(A)、Td=20(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{20}{100} + 36.49$$

=36.29(A)

$32 \leq t \leq 32$ の時

(16)式に、L=100(μH)、c3=36.49(A)、Td=0(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{1}{100} \times 0 + 36.49$$

=36.49(A)

となる。以上の結果より Td(無付加電圧印加時間)が 0μsec ではリアクトル電流値は下がらないが、Td が 2000(μsec)のように長くなると、リアクトル電流が非常に下がることが分かる。

④ パルス幅(放電中)の立ち上がり

(4)式より

$$i4=\frac{(V-Vg)}{L}t4+c4 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (17)$$

$$t4=\frac{(i4-c4)L}{(V-Vg)} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (18)$$

(17)式の t4 を左辺に移項すると(18)になる。

(18)でパルス幅(放電中)のリアクトル電流を求め、(18)の式で、リアクトル電流が上限(36.75A)に達するまでの時間を求めることができる。

## $2032 \leq t \leq 2040$ の時

(18)の式に、V=60(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=16.49(A)を代入し計算すると

$$t4=\frac{(36.75-16.49)\times 100}{(60-20)}$$

=50.65(μsec)

Td が 2000(μsec)の場合、放電の立ち上がりは 50.65(μsec)の時間で上限値の 36.75(A)になることが分かる。しかし、パルス幅は 8(μsec)と短いので、リアクトル電流は上限値まで達しない。そこで(17)式の T4=8(μsec)を代入して計算すると

$$i4=\frac{(60-20)}{100}\times 8+16.49$$

=19.69(A)

パルス幅 8(μsec)で 19.69(A)までしかリアクトル電流は上がらないことになる。

## $1032 \leq t \leq 1040$ の時

(18)の式に、V=60(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=26.49(A)を代入し計算すると

$$t4=\frac{(36.75-26.49)\times 100}{(60-20)}$$

=25.65(μsec)

Td が 1000(μsec)の場合、放電の立ち上がりは 25.65(μsec)の時間で上限値の 36.75(A)になることが分かる。しかし、パルス幅は 8(μsec)と短いので、リアクトル電流は上限値まで達しない。そこで(17)式の T4=8(μsec)を代入して計算すると

$$i4=\frac{(60-20)}{100}\times 8+26.49$$

=29.69(A)

パルス幅 8(μsec)で 29.69(A)までしかリアクトル電流は上がらないことになる。

## $32 \leq t \leq 33.15$ の時

(18)の式に、V=60(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=36.29(A)を代入し計算すると

$$t4 = \frac{(36.75 - 36.29) \times 100}{(60 - 20)}$$

=1.15(μsec)

Td が 20(μsec)と短い場合、放電の立ち上がりは 1.15(μsec)と瞬時に上限値の 36.75(A)に達することになる。

## $32 \leq t \leq 32.65$ の時

(18)の式に、V=60(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=36.49(A)を代入し計算すると

$$t4 = \frac{(36.75 - 36.49) \times 100}{(60 - 20)}$$

=0.65(μsec)

Td が 0(μsec)では、放電の立ち上がりは 0.83(μsec)で上限値の 36.75(A)に達することになる。

⑤ パルス幅(放電中)の立ち下がり

(4)式より

$$i5 = -\frac{Vg}{L}t5 + c5 \quad \cdots\cdots\cdots\

$32.83 \leq t \leq 40$ の時

(12)の式に、Vg=20(V)　L=100μH　i5=36.75(A)、t5=7.35(μsec)を代入し計算すると

$$i5 = -\frac{20}{100} \times 7.35 + 36.75$$

=35.28(A)

パルス幅 8(μsec)で Td が 0(μsec)の時、放電の立ち上がりに 0.65(μsec)時間がかかる。そこで立下りの時間は 7.35(μsec)となる。(19)の式に代入して計算すると、7.35(μsec)後には、リアクトル電流は 35.28(A)まで下がることができる。

・電圧 70V の時のリアクトル電流について

$0 \le t \le 5$ の時

① を流れる電流(休止時間中のリアクトル電流の立ち上がり)

(1)式の t を左辺に移項すると

$$t1 = \frac{(i1 - c1)L}{V} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (20)$$

上の(20)式になる。(20)式に i1=36.75(A)、V=70(V)、L=100μH、c1=33.25(A)を代入すると

$$t1 = \frac{(36.75 - 33.25) \times 100}{70}$$

$$= 5(\mu \mathrm{sec})$$

となる。休止時間中のリアクトル電流の立ち上がりは 5(μsec)時間がたつとリアクトル電流は 36.75(A)の上限まで達することになる。

② を流れる電流(休止時間中のリアクトル電流の立ち下がり)

$5 \le t \le 32$ の時

(2)の式より

$$i2 = -\frac{1}{L} t2 + c2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (21)$$

$$t2 = (c2 - i2)L \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (22)$$

(21)式の t2 を左辺に移項すると(22)式になる。(22)式に、c2=36.75(A)、i2=33.25(A)、L=100μH を代入すると

$$t2 = (36.75 - 33.25) \times 100$$

$$= 350(\mu \mathrm{sec})$$

となる。休止時間が長いと 350(μsec)たつとリアクトル電流は 33.25(A)までさがるが、休止時間が 32(μsec)と短いので、(21)の式に t2=27μsec、c2=36.75(A)代入すると

$$i2 = -\frac{1}{100} \times 27 + 36.75$$

$$i2 = 36.48(A)$$

となる。休止時間中のリアクトル電流の立ち下りは 27(μsec)たつと 36.48(A)まで下がる。

③ Td の立ち下り

(3)式より

$$i3 = -\frac{1}{L}Td + c3 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (23)$$

$32 \le t \le 2032$ の時

(23)式に、L=100(μH)、c3=36.48(A)、Td=2000(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{2000}{100} + 36.48$$

=16.48(A)

$32 \le t \le 1032$ の時

(23)式に、L=100(μH)、c3=36.48(A)、Td=1000(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{1000}{100} + 36.48$$

=26.48(A)

$32 \le t \le 52$ の時

(16)式に、L=100(μH)、c3=36.48(A)、Td=20(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{20}{100} + 36.48$$

=36.28A)

$32 \le t \le 32$ の時

(16)式に、L=100(μH)、c3=36.48(A)、Td=0(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{1}{100} \times 0 + 36.48$$

=36.48(A)

となる。以上の結果より Td(無付加電圧印加時間)が 0μsec ではリアクトル電流値は下がらないが、Td が 2000(μsec)のように長くなると、リアクトル電流が非常に下がることが分かる。

④ パルス幅(放電中)の立ち上がり

(4)式より

$$i4=\frac{(V-Vg)}{L}t4+c4 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (24)$$

$$t4=\frac{(i4-c4)L}{(V-Vg)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (25)$$

(24)式の t4 を左辺に移項すると(25)になる。

(24)でパルス幅(放電中)のリアクトル電流を求め、(25)の式で、リアクトル電流が上限(36.75A)に達するまでの時間を求めることができる。

## $2032 \le t \le 2040$ の時

(25)の式に、V=70(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=16.48(A)を代入し計算すると

$$t4=\frac{(36.75-16.48)\times 100}{(70-20)}$$

=40.54(μsec)

Td が 2000(μsec)の場合、放電の立ち上がりは 40.54(μsec)の時間で上限値の 36.75(A)になることが分かる。しかし、パルス幅は 8(μsec)と短いので、リアクトル電流は上限値まで達しない。そこで(24)式の T4=8(μsec)を代入して計算すると

$$i4=\frac{(70-20)}{100}\times 8+16.48$$

=20.48(A)

パルス幅 8(μsec)で 20.48(A)までしかリアクトル電流は上がらないことになる。

## $1032 \le t \le 1040$ の時

(25)の式に、V=70(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=26.48(A)を代入し計算すると

$$t4=\frac{(36.75-26.48)\times 100}{(70-20)}$$

=20.54(μsec)

Td が 1000(μsec)の場合、放電の立ち上がりは 20.54(μsec)の時間で上限値の 36.75(A)になることが分かる。しかし、パルス幅は 8(μsec)と短いので、リアクトル電流は上限値まで達しない。そこで(24)式の T4=8(μsec)を代入して計算すると

$$i4=\frac{(70-20)}{100}\times 8+26.48$$

=30.48(A)

パルス幅 8(μsec)で 30.48(A)までしかリアクトル電流は上がらないことになる。

## $32 \le t \le 32.94$ の時

(25)の式に、V=70(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=36.28(A)を代入し計算すると

$$t4 = \frac{(36.75 - 36.28) \times 100}{(70 - 20)}$$

=0.94(μsec)

Td が 20(μsec)と短い場合、放電の立ち上がりは 0.94(μsec)と瞬時に上限値の 36.75(A)に達することになる。

## $32 \le t \le 32.65$ の時

(18)の式に、V=70(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=36.48(A)を代入し計算すると

$$t4 = \frac{(36.75 - 36.48) \times 100}{(70 - 20)}$$

=0.54(μsec)

Td が 0(μsec)では、放電の立ち上がりは 0.54(μsec)で上限値の 36.75(A)に達することになる。

⑤ パルス幅(放電中)の立ち下がり

(4)式より

$$i5 = -\frac{Vg}{L}t5 + c5 \quad \cdots\cdots\cdots\

$32.83 \leq t \leq 40$ の時

(26)の式に、Vg=20(V)　L=100μH　i5=36.75(A)、t5=7.46(μsec)を代入し計算すると

$$i5 = -\frac{20}{100} \times 7.46 + 36.75$$

=35.25(A)

パルス幅 8(μsec)で Td が 0(μsec)の時、放電の立ち上がりに 0.54(μsec)時間がかかる。そこで立下りの時間は 7.46(μsec)となる。(26)の式に代入して計算すると、7.46(μsec)後には、リアクトル電流は 35.25(A)まで下がることができる。

・電圧 80V の時のリアクトル電流について

$0 \le t \le 5$ の時

① を流れる電流(休止時間中のリアクトル電流の立ち上がり)

(1)式の t を左辺に移項すると

$$t1 = \frac{(i1 - c1)L}{V} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (27)$$

上の(27)式になる。(27)式に i1=36.75(A)、V=80(V)、L=100μH、c1=33.25(A)を代入すると

$$t1 = \frac{(36.75 - 33.25) \times 100}{80}$$

$$= 4.375(\mu \sec)$$

となる。休止時間中のリアクトル電流の立ち上がりは 4.375(μsec)時間がたつとリアクトル電流は 36.75(A)の上限まで達することになる。

② を流れる電流(休止時間中のリアクトル電流の立ち下がり)

$4.375 \le t \le 32$ の時

(2)の式より

$$i2 = -\frac{1}{L} t2 + c2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (28)$$

$$t2 = (c2 - i2)L \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (29)$$

(28)式の t2 を左辺に移項すると(29)式になる。(29)式に、c2=36.75(A)、i2=33.25(A)、L=100μH を代入すると

$$t2 = (36.75 - 33.25) \times 100$$

$$= 350(\mu \sec)$$

となる。休止時間が長いと 350(μsec)たつとリアクトル電流は 33.25(A)までさがるが、休止時間が 32(μsec)と短いので、(28)の式に t2=27.625μsec、c2=36.75(A)代入すると

$$i2 = -\frac{1}{100} \times 27.625 + 36.75$$

$$i2 = 36.473(A)$$

となる。休止時間中のリアクトル電流の立ち下りは 27.625(μsec)たつと 36.473(A)まで下がる。

③ Td の立ち下り

(3)式より

$$i3 = -\frac{1}{L}Td + c3 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (30)$$

$32 \leq t \leq 2032$ の時

(28)式に、L=100(μH)、c3=36.48(A)、Td=2000(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{2000}{100} + 36.473$$

=16.473(A)

$32 \leq t \leq 1032$ の時

(28)式に、L=100(μH)、c3=36.48(A)、Td=1000(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{1000}{100} + 36.473$$

=26.473(A)

$32 \leq t \leq 52$ の時

(28)式に、L=100(μH)、c3=36.48(A)、Td=20(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{20}{100} + 36.473$$

=36.273A)

$32 \leq t \leq 32$ の時

(16)式に、L=100(μH)、c3=36.48(A)、Td=0(μsec)を代入すると

$$i3 = -\frac{1}{100} \times 0 + 36.473$$

=36.473(A)

となる。以上の結果より Td(無付加電圧印加時間)が 0μsec ではリアクトル電流値は下がらないが、Td が 2000(μsec)のように長くなると、リアクトル電流が非常に下がることが分かる。

④ パルス幅(放電中)の立ち上がり

(4)式より

$$i4=\frac{(V-Vg)}{L}t4+c4 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (31)$$

$$t4=\frac{(i4-c4)L}{(V-Vg)} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (32)$$

(31)式の t4 を左辺に移項すると(32)になる。

(31)でパルス幅(放電中)のリアクトル電流を求め、(32)の式で、リアクトル電流が上限(36.75A)に達するまでの時間を求めることができる。

## $2032 \le t \le 2040$ の時

(32)の式に、V=80(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=16.47(A)を代入し計算すると

$$t4=\frac{(36.75-16.47)\times 100}{(80-20)}$$

=33.8(μsec)

Td が 2000(μsec)の場合、放電の立ち上がりは 33.8(μsec)の時間で上限値の 36.75(A)になることが分かる。しかし、パルス幅は 8(μsec)と短いので、リアクトル電流は上限値まで達しない。そこで(31)式の T4=8(μsec)を代入して計算すると

$$i4=\frac{(80-20)}{100}\times 8+16.47$$

=21.27(A)

パルス幅 8(μsec)で 21.27(A)までしかリアクトル電流は上がらないことになる。

## $1032 \le t \le 1040$ の時

(32)の式に、V=80(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=26.47(A)を代入し計算すると

$$t4=\frac{(36.75-26.47)\times 100}{(80-20)}$$

=17.13(μsec)

Td が 1000(μsec)の場合、放電の立ち上がりは 17.13(μsec)の時間で上限値の 36.75(A)になることが分かる。しかし、パルス幅は 8(μsec)と短いので、リアクトル電流は上限値まで達しない。そこで(31)式の T4=8(μsec)を代入して計算すると

$$i4=\frac{(80-20)}{100}\times 8+26.47$$

=31.27(A)

パルス幅 8(μsec)で 31.27(A)までしかリアクトル電流は上がらないことになる。

## $32 \leq t \leq 32.8$ の時

(32)の式に、V=80(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=36.27(A)を代入し計算すると

$$t4 = \frac{(36.75 - 36.27) \times 100}{(80 - 20)}$$

=0.8(μsec)

Td が 20(μsec)と短い場合、放電の立ち上がりは 0.8(μsec)と瞬時に上限値の 36.75(A)に達することになる。

## $32 \leq t \leq 32.46$ の時

(32)の式に、V=80(V)　Vg=20(V)　L=100μH　i4=36.75(A)、c4=36.47(A)を代入し計算すると

$$t4 = \frac{(36.75 - 36.47) \times 100}{(80 - 20)}$$

=0.46(μsec)

Td が 0(μsec)では、放電の立ち上がりは 0.46(μsec)で上限値の 36.75(A)に達することになる。

⑤ パルス幅(放電中)の立ち下がり

(4)式より

$$i5 = -\frac{Vg}{L}t5 + c5 \quad \cdots\cdots\cdots\

$32.46 \leq t \leq 40$ の時

(32)の式に、Vg=20(V)　L=100μH　i5=36.75(A)、t5=7.54(μsec)を代入し計算すると

$$i5 = -\frac{20}{100} \times 7.53 + 36.75$$

=35.24(A)

パルス幅 8(μsec)で Td が 0(μsec)の時、放電の立ち上がりに 0.46(μsec)時間がかかる。そこで立下りの時間は 7.54(μsec)となる。(32)の式に代入して計算すると、7.54(μsec)後には、リアクトル電流は 35.24(A)まで下がることができる。

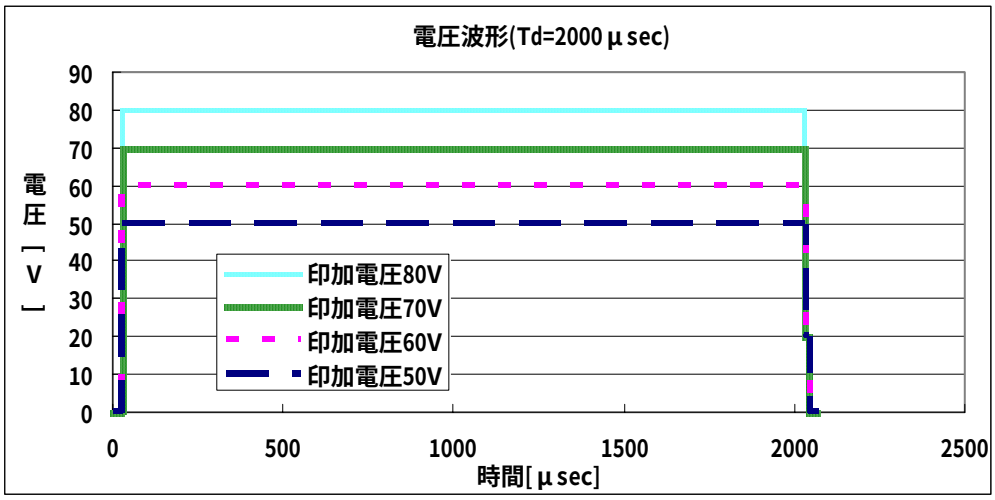


図.3-10　印加電圧を変化させた時の電圧波形

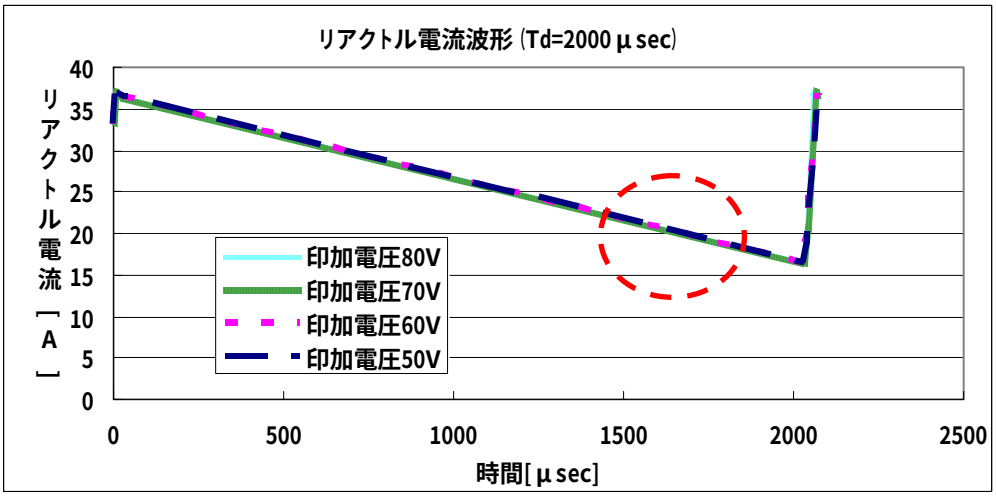


図.3-11　リアクトル電流波形

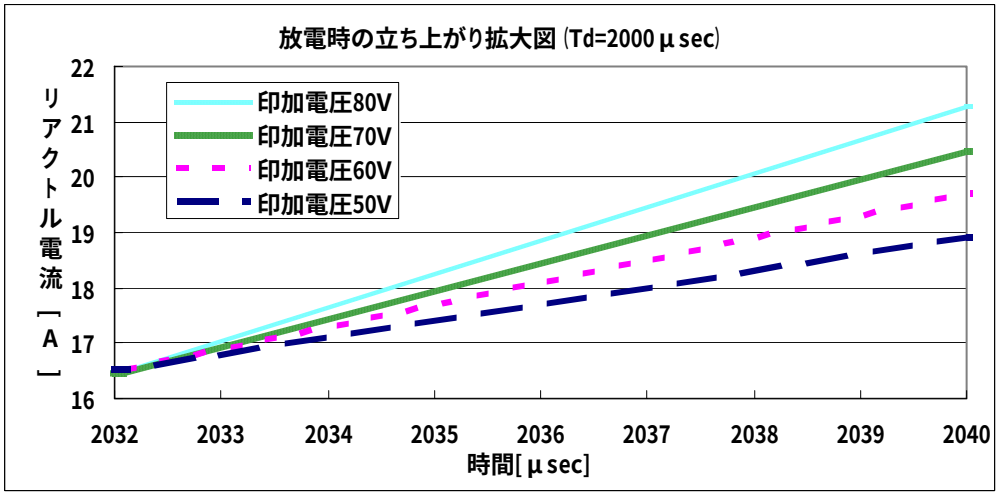


図.3-12　放電時の立ち上がり拡大図

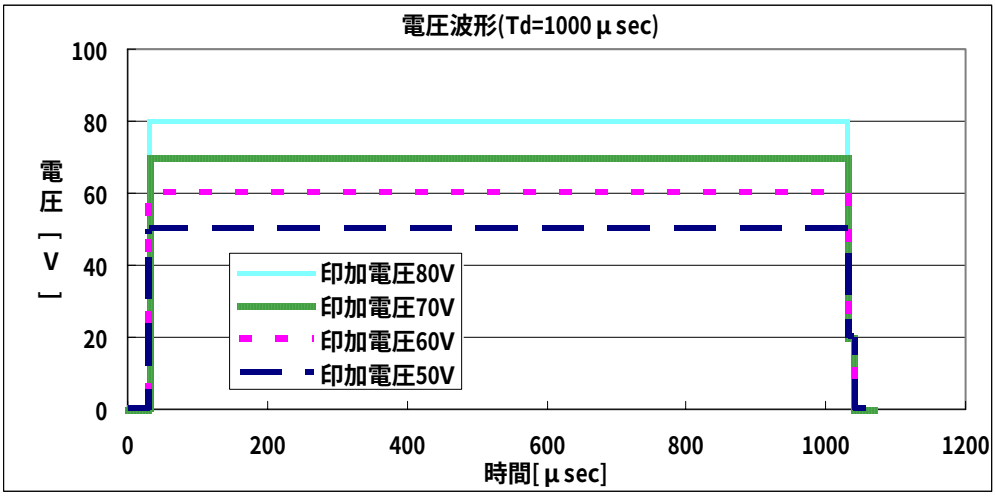


図.3-13　印加電圧を変化させた時の電圧波形

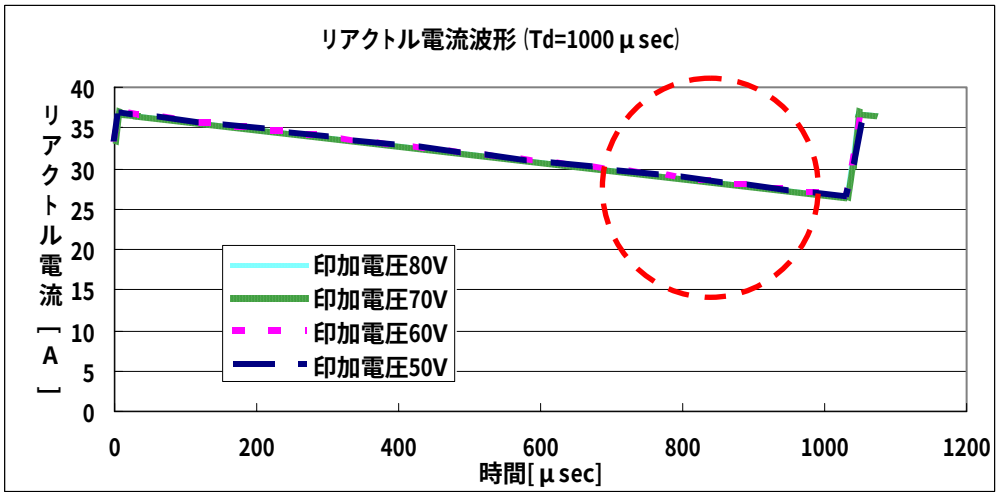


図.3-14　リアクトル電流波形

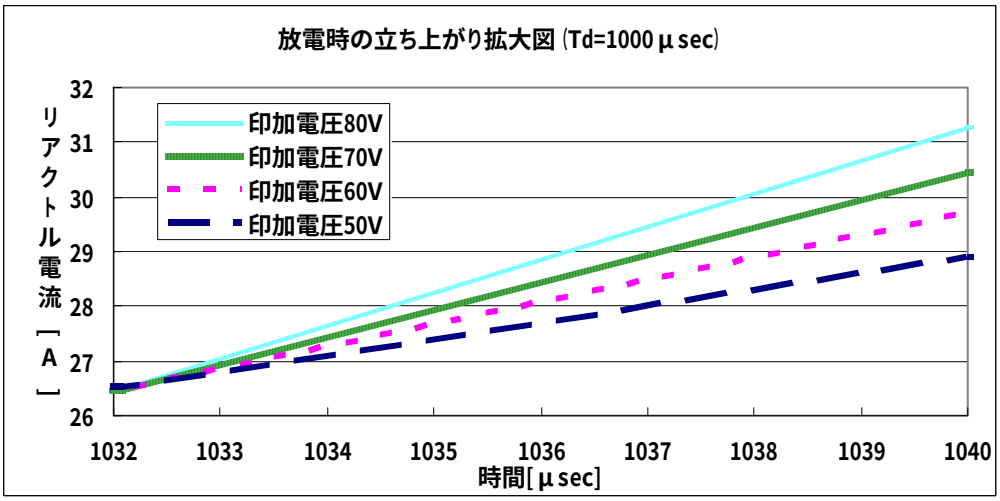


図.3-15　放電時の立ち上がり拡大図

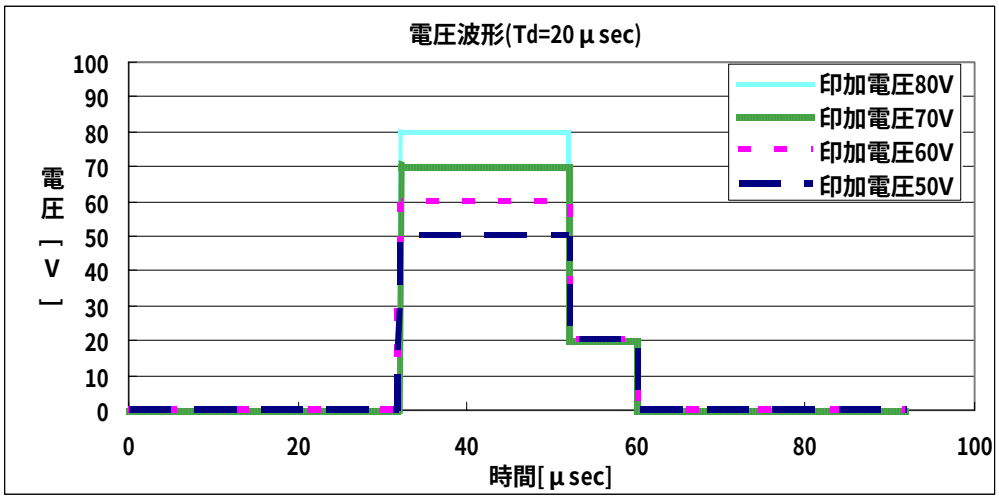


図.3-16　印加電圧を変化させた時の電圧波形

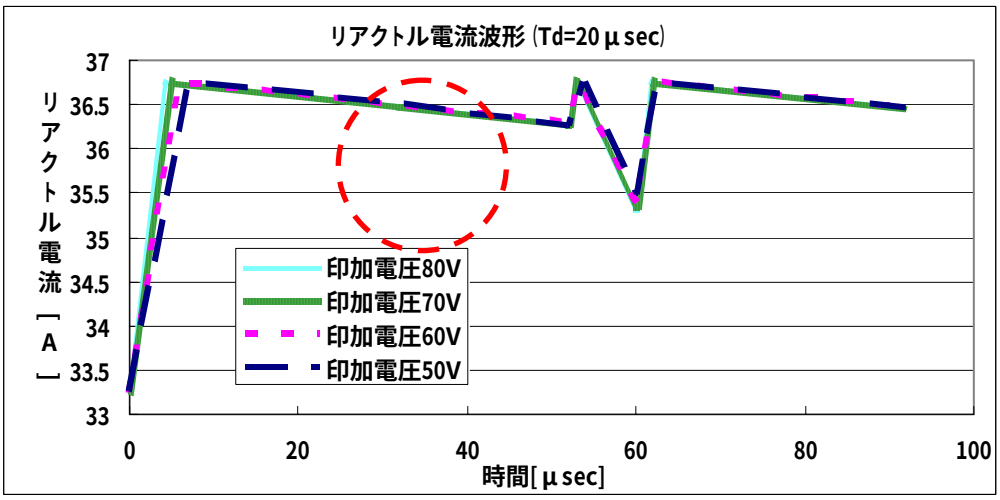


図.3-17　リアクトル電流波形

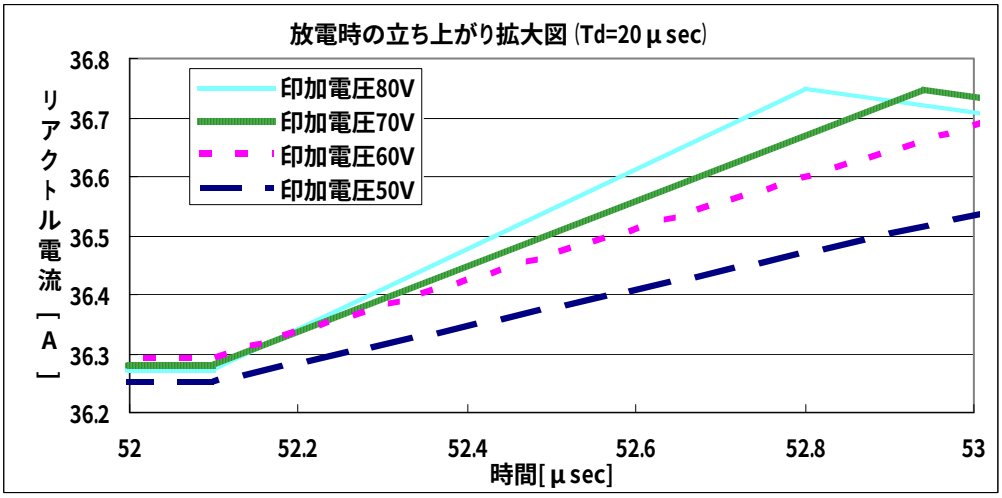


図.3-18　放電時の立ち上がり拡大図

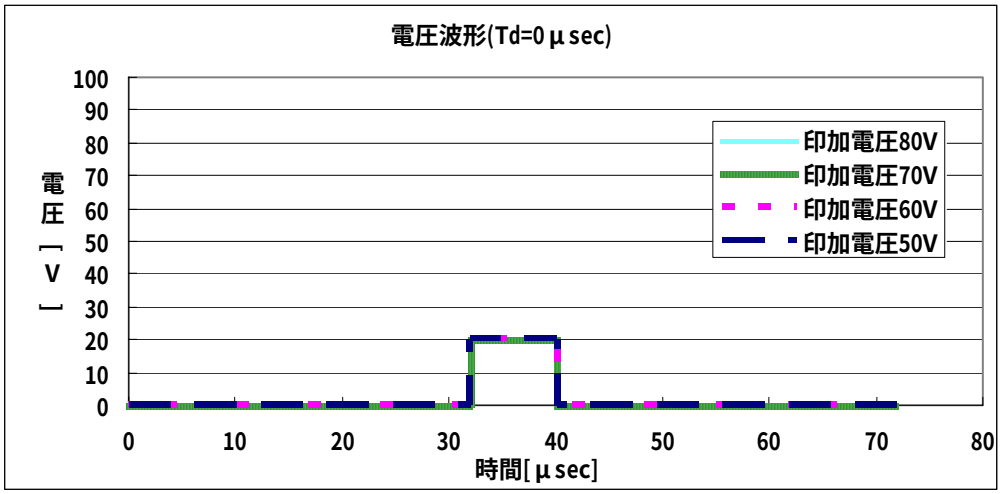


図.3-19　印加電圧を変化させた時の電圧波形

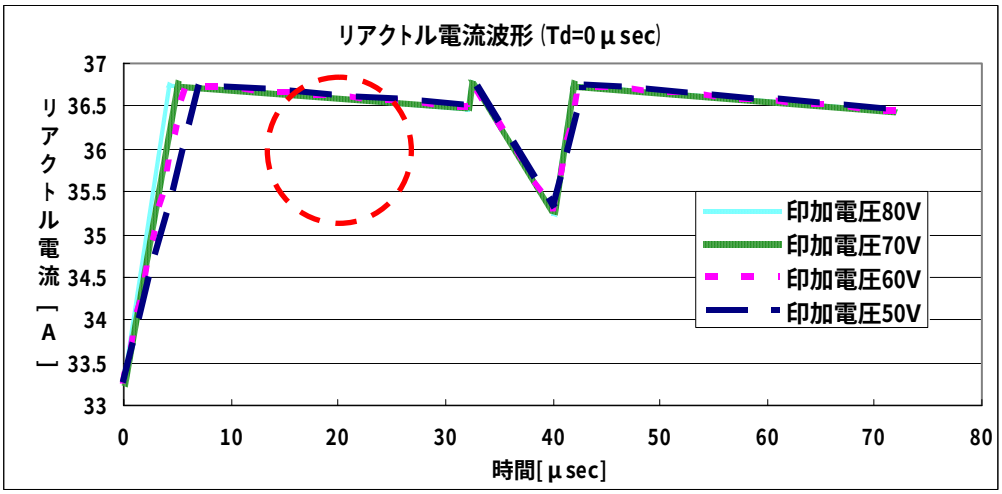


図.3-20　リアクトル電流波形

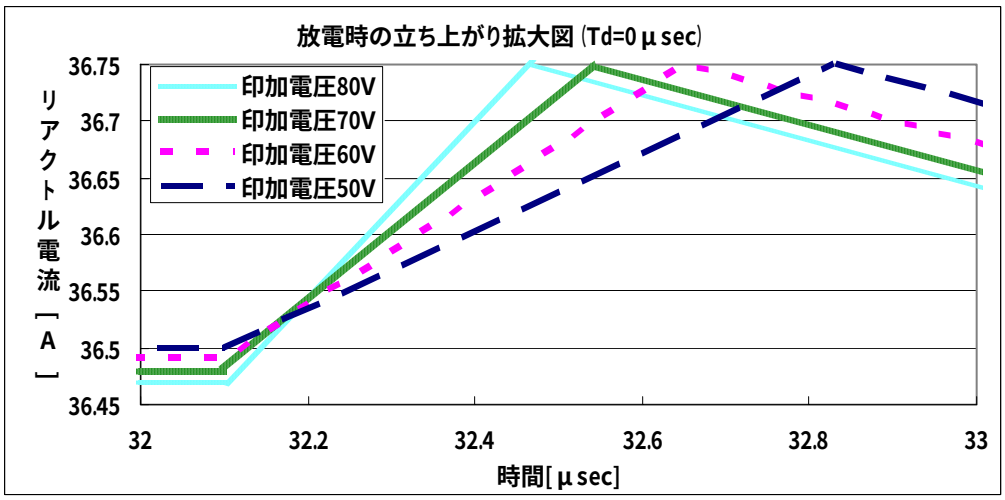


図.3-21　放電時の立ち上がり拡大図

・リアクトル電流波形の考察

図 3-10 から図 3-21 までのグラフは、計算結果をもとに Td を 2000、1000、20、0μsec とし、それぞれの電圧波形、リアクトル電流波形、放電時のリアクトル電流立ち上がり拡大図を示したものである。これらを見ると、印加電圧による変化というのは休止時間中の立ち上がりと放電中の立ち上がりのみでしかみられない。加工に関係する放電中のリアクトル電流の立ち上がりに注目すると、印加電圧 80V のとき立ち上がりの傾きは（80－20）／100＝0.6 なのに対し、印加電圧 50V では（50－20）／100＝0.3 と半分になることがわかる。単発放電での大きな差はないとしても数万回放電が起きるとすれば、この放電中の立ち上がりの差が加工速度に大きく影響すると考えられる。他にも電源回路改造時の抵抗の値が最適ではない、Td が長くなりすぎてしまうことにより自励発振が起きている、あるいは回路構造上限界があるのかもしれないということが考えられる。

・印加電圧とサーボ電圧の関係について

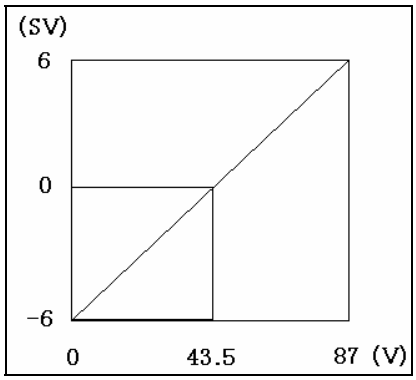


図.3-22 印加電圧とサーボ電圧の関係

図.3-22 のグラフは、印加電圧とサーボ電圧の関係を示したグラフになっている。このグラフは印加電圧 87V の時、サーボ電圧 0 の値が 43.5V と印加電圧に対する 2 分の 1 が SV0 であると決められている。しかし今回の研究では、印加電圧を 80、70、60、50V と電圧を低くしていった場合でも、サーボ電圧の値は 43.5V と一定の条件であった。しかし今回の研究では印加電圧を下げるにしたがって Td(無付加電圧印加時間)の値が長くなった。そこで印加電圧を下げた時に Td(無付加電圧印加時間)の値がどの程度長くなっているかについて(34)の式を使って計算した。

表.3-1

| | |
|---|---|
| **パルス幅(On)** | **8(μsec)** |
| **休止時間(Off)** | **32(μsec)** |
| **Eg(ギャップ電圧)** | **20(V)** |
| **SV(サーボ電圧)** | **43.5(V)** |

$$Td = \frac{SV(On + Off) - On * Eg}{GAP - SV} \quad \cdots\cdots\cdots\

表.3-3　印加電圧とサーボ電圧

| | SV | 電圧(V) |
|---|---|---|
| 印加電圧 80V | -0.5 | 39.87 |
| 印加電圧 70V | -1 | 36.25 |
| 印加電圧 60V | -2 | 29 |
| 印加電圧 50V | -2.5 | 25.37 |

表.3-4　印加電圧を変化させた時の Td

| | Td(μsec) |
|---|---|
| 印加電圧 80V | 35.75 |
| 印加電圧 70V | 38.2 |
| 印加電圧 60V | 32.25 |
| 印加電圧 50V | 40.7 |

表.3-3 のサーボ電圧を元に、(34)の式に代入して計算すると表.3-4 に示したように、印加電圧 80V～50V と電圧を下げても Td(無付加電圧印加時間)35μsec から 40μsec とほとんど変化していないことが分かる。このようにサーボ電圧を実際の印加電圧の 2 分の 1 に設定すると Td(無付加電圧印加時間)は、ほとんど同じ値になる。

# 第 4 章　電極に歯車を用いたサンプル加工

## 1.加工方法

本実験では、電極に歯車を加工し印加電圧を 50V、80V それぞれの電圧で実際に超硬合金へ加工をおこなっていく。電極は図.4-1 に示すような条件の元でワイヤカット放電加工機により電極形状を作成した。ワイヤカット放電加工機により加工後の電極形状を図.4-2 に示す。この歯車電極を用いて超硬合金に Z-1mm まで加工をおこなっていく。加工条件として印加電圧 50、80V は、表.4-1 に示す条件を用いて荒加工から仕上げ加工まで加工をおこなった。

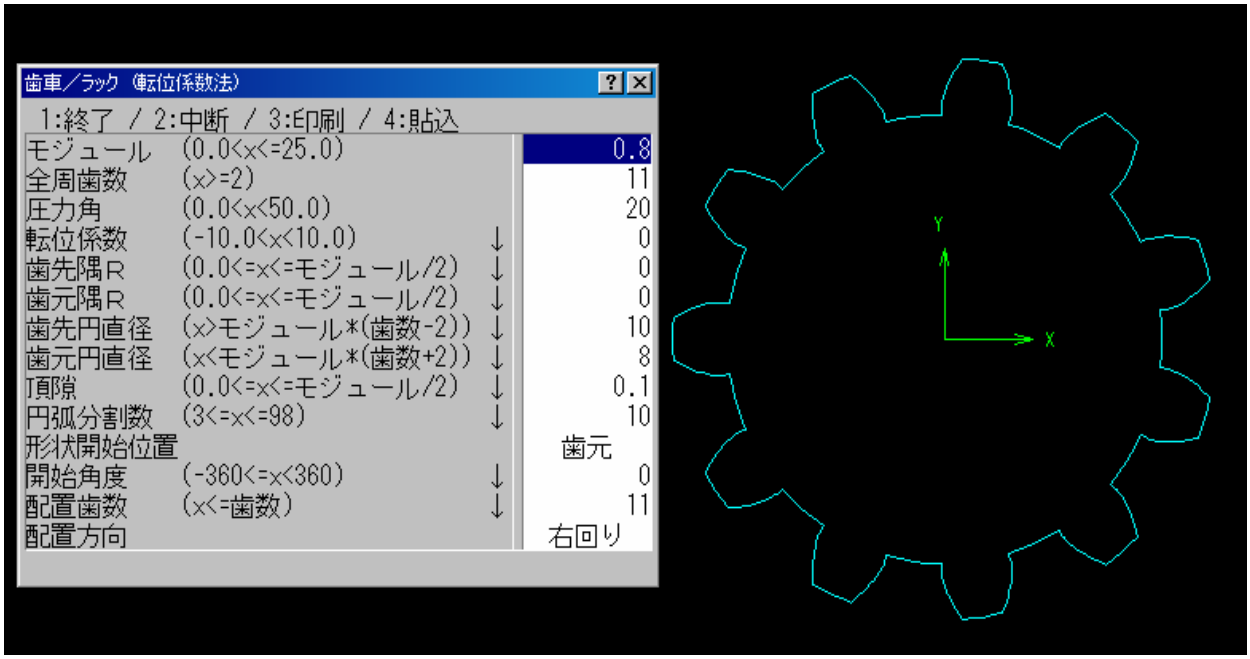


図.4-1　歯車の断面形状

表.4-1　加工条件

| | 荒加工 | 中加工 | | 仕上加工 | |
|---|---|---|---|---|---|
| IP(電流値) | 5.5 | 4.5 | 3.5 | 2.5 | 1.5 |
| On(パルス幅) | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| Off(休止時間) | 7 | 6 | 5 | 4 | 4 |
| GAP | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| JUMP | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| JU | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| JD | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

図.4-2　電極形状

2.サンプル加工後

・印加電圧 50V

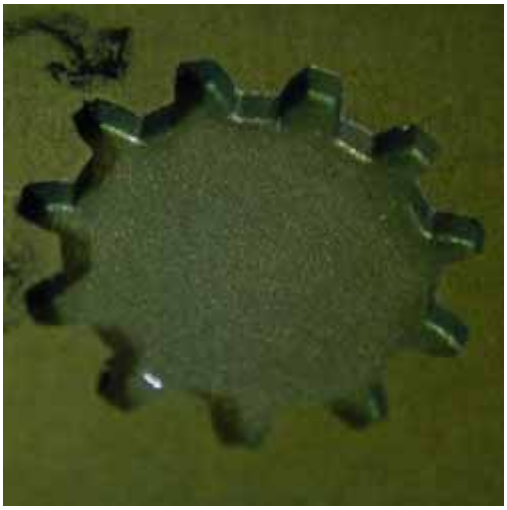

図.4-3　加工後のワーク断面形状

図.4-4　加工後の電極断面形状

・印加電圧 80V

図.4-5　加工後のワーク断面形状

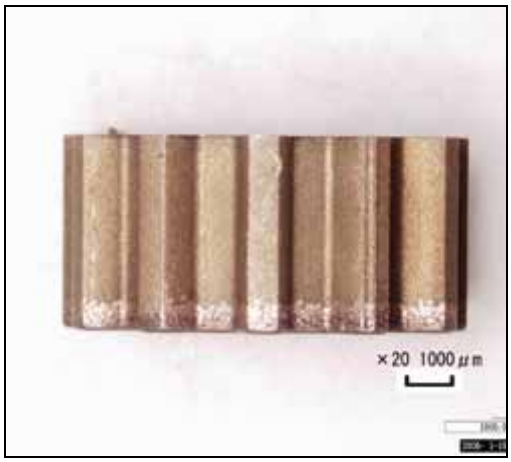


図.4-6　加工後の電極断面形状

・加工後の表面粗さ

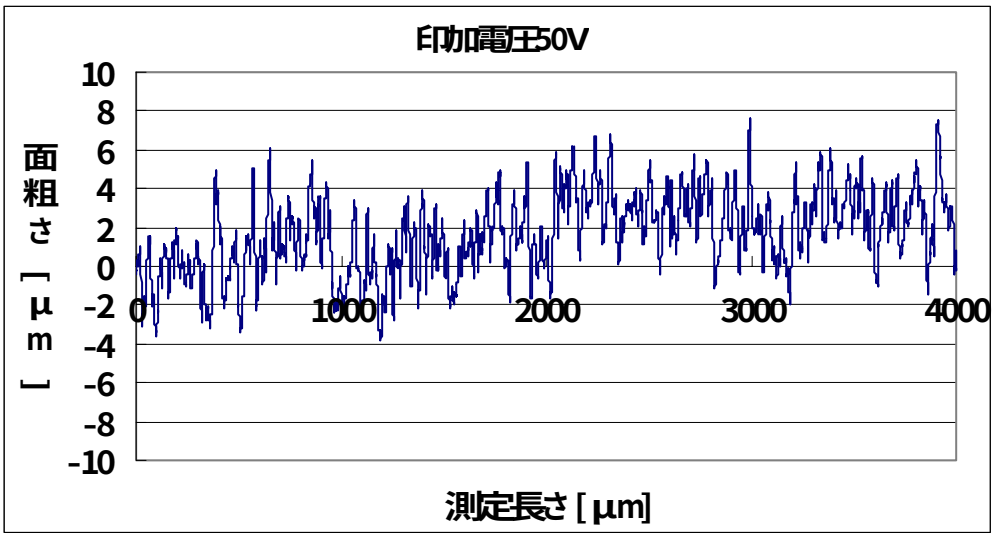


図.4-7　加工後のワークの表面粗さ(印加電圧 50V)

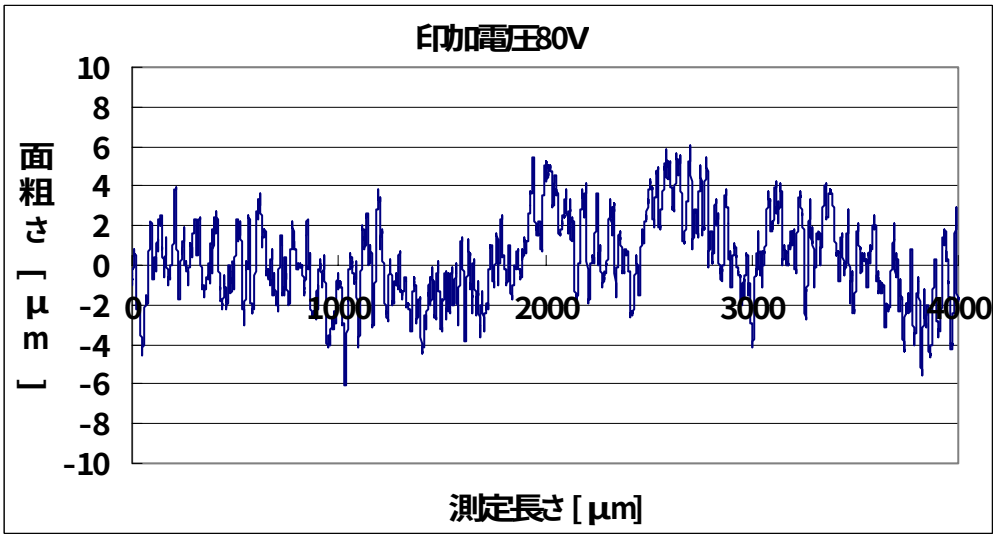


図.4-8　加工後のワークの表面粗さ(印加電圧 80V)

サンプル加工の考察

図.4-3 と図.4-5 の写真は、印加電圧 50 と 80V の条件で直径 10mm の歯車を Z-1mm 加工後のワークの断面形状を示す。また図.4-4 と図.4-6 には加工後の電極断面形状を示している。このように印加電圧 50、80V と電圧を変化させても加工後のワーク断面形状及び電極消耗形状は印加電圧を変化させてもさほど変化がないことが分かる。次に図.4-7 と図.4-8 にはワークの表面粗さを示している。表面粗さも電圧を変化させてもおよそ 6μm と加工後のワーク断面形状にはほとんど差が見られないことがこのグラフより分かる。以上の結果より印加電圧を変化させても加工が安定していれば消耗形状は変化しないことがサンプル加工結果より分かる。

# 第５章　結言

本研究は、極間印加電圧を 80V から 50V まで変化させることで電極消耗形状がどのように変化するかについて検討したものである。パルス幅 8μsec で Z-1mm 加工する条件では、印加電圧 80V から 50V まで変化させることで電極消耗形状は 80 から 70μm と消耗量が減少させることができた。電圧を下げると電極消耗形状が減少するので加工後のワークの加工深さも 950 から 980μm と深くまで加工することができた。またパルス幅 8μsec の条件では、加工後のワークコーナー部分や底面へクラックが発生せず加工ができた。

パルス幅 8μsec の条件で Z-1mm 加工すると印加電圧を変化させても体積消耗率は 9 パーセント以下で加工することができた。

次に、パルス幅を少し長くした 64μsec でも電圧を 80 から 50V と電圧を変化させると電極消耗形状は 110 から 70μm と消耗量が減少させることができた。このように電圧を下げると電極消耗形状を少なくすることができるので加工後のワークの加工深さも印加電圧を下げるにつれ 880 から 920 μm と電圧を低くすることで深くまで加工することができた。しかしパルス幅を長くした 64μsec の条件は、加工後のワークコーナー部分や底面へクラックが入っており実際の金型加工には適さない条件であることも判明した。また堆積消耗率も印加電圧を 50V から 80V に変化させると 10 パーセントから 12 パーセントの消耗率になることがわかった。

パルス幅 8μsec、64μsec の両方の加工条件に共通していえることは、加工中の電流波形のピーク値が印加電圧を下げるにつれ小さくなる傾向が見られた。その結果、Z-1mm 加工する場合の加工速度が印加電圧を 80、70、60、50V と下げるにつれ速度が低下しており、60V から 50V へ電圧を下げると極端に速度が低下した。このように電圧を下げると電極消耗形状は減少させることができるが、電流ピーク値が小さくなり加工速度が低下するのでどちらがいいかは判断しにくい。そこで第 3 章では印加電圧を下げると加工速度が低下する原因について解析していく。

サンプル加工として直径 10mm の歯車を印加電圧 50、80V と変化させ加工をおこなったが、加工後のワーク断面形状及び電極消耗形状は印加電圧を変化させてもほとんど変化が見られなかった。加工後のワークの表面粗さも、電圧を変化させてもおよそ 6μm と表面粗さにも差が見られないことから、印加電圧を変化させても加工が安定していれば消耗形状及び加工形状にさほど変化が見られないことがサンプル加工よりわかった。

## 謝辞

本研究及び本論文は、小林和彦教授のご指導の元に行われ完成するに至りました。
終始ご指導を賜りました同教授に厚くお礼申し上げます。
共同研究者の山本浩司氏には研究を進めるにあたり、多くのご教示、御助言を頂くと共に、研究外の事柄に対しても非常に御世話になり、同氏に深くの感謝の意を示すものであります。
高知県立高知東高等学校　教師の垣内和彦氏には、技術指導並びに実験試料作製にあたり研磨装置をお借りしましたこと、深く感謝しております。
また、特殊加工研究室及び長尾研究室の方々には本研究の完成に際し、ご援助、ご協力を頂いた事に感謝し、お礼申し上げる次第であります。

## 参考文献

著者・監修；斎藤長男
『放電加工のしくみと 100%活用法』(1979)
P131～135
発行所；株式会社技術評論社

著者；斎藤長男、毛利尚武、高鷲民生、古谷正典
『放電加工機術　基礎から将来展望まで』
P28,29　P40～50
発行所；日刊工業新聞社

監修；小林昭
『超精密生産技術大系 第 2 巻 実用技術』(1994.8.)
P340～343、P348～361
発行所；株式会社フジ・テクノシステム

三菱電機
『DynaTechBook 放電加工の手引き』

三菱電機
『三菱 NC 形彫放電加工機 VX シリーズ　取扱説明書』